

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**Caracterização em rádio-frequências da taxa de
formação estelar de galáxias sem bojo a *redshifts*
intermédios**

João Nuno Cardoso Travassos Retrê

Mestrado em Física
Especialização em Astrofísica e Cosmologia

Dissertação orientada por:
Professor Doutor José Manuel Lourenço Coutinho Afonso

2016

*"We make our world significant by the courage of our questions and the
depth of our answers."*

Carl Sagan

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Doutor José Afonso, pela sua orientação paciente e dedicada que culminou na realização desta dissertação. Agradeço também todos os conhecimentos que por ele me foram transmitidos ao longo do meu percurso académico e profissional.

À minha família, em particular aos meus pais, pela sua amizade e todo o apoio incondicional. Obrigado por me incentivarem a nunca deixar de acreditar e sonhar.

À Marlise Fernandes, pelas incontáveis horas de perseverança, ajuda e palavras de incentivo constantes no decorrer da escrita desta tese.

Ao Hugo Messias pelo seu grande apoio na realização deste trabalho, incluindo a disponibilização do algoritmo de *stacking* utilizado nesta dissertação.

Ao Luca Bizzocchi pelas suas explicações importantes do catálogo de galáxias sem bojo e cedência do algoritmo de *likelihood ratio*.

Ao Doutor Martin Lauterbach por todo o acompanhamento e dedicação, que resultou numa melhoria da minha qualidade de vida, o que permitiu, após um grande interregno, concluir este trabalho.

À Ana Queiróz pelo inestimável apoio e incentivo. Obrigado pela tranquilidade transmitida em todos os momentos em que tal se revelou necessário.

Ao meu grande amigo Padre João de Brito por todas as conversas e conselhos inestimáveis.

Ao meu grande amigo Pedro Figueira por anos incontáveis de amizade, companheirismo e histórias memoráveis.

Ao Pedro Machado pelo seu incentivo constante, oportunidades e pelas aventuras memoráveis em terras do oriente.

Ao David Luz pelas suas sábias palavras, que ainda guardo, e descontração.

Ao Fernando Buitrago e Israel Matute por se terem demonstrado sempre disponíveis para apoiar.

Ao Jesualdo e Patrícia Fernandes pelo apoio logístico e todos os momentos de sorrisos.

Ao Carlos Santos pela sua paciência na resolução de problemas informáticos que foram decorrendo no decurso deste trabalho.

À Halima Naimova pela excelente assistência em todas as pesquisas bibliográficas

e pesquisa de material para esta dissertação.

Aos Professores João Lin Yun e Rui Agostinho por anos de transmissão de conhecimentos, orientação e aconselhamento.

À Joana Oliveira, João Calhau e Rúben Gonçalves por todos os momentos em que me apoiaram.

A todo o pessoal do Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço (IA) e do Observatório Astronómico de Lisboa (OAL).

A todo o corpo docente do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pelos conhecimentos preciosos que adquiri ao longo do meu percurso académico.

Foram tantas as pessoas que me ajudaram no decorrer deste trabalho que não gostaria de deixar ninguém de fora. Contudo, caso isto tenha acontecido, a todas elas deixo o meu agradecimento sincero e a certeza de que estarei sempre presente.

Resumo

As galáxias sem bojo estão presentes em grande número no Universo e, apesar desta evidência observacional, continuam a constituir um problema para qualquer modelo que tente recriar os mecanismos de formação e evolução de galáxias. A nossa compreensão de como estas estruturas podem existir num Universo onde, segundo os paradigmas atuais, a formação de estruturas se procede de forma hierárquica, é de extrema importância para a investigação atual em galáxias.

Nesta dissertação é estudada a taxa de formação estelar, em radiofrequências, de galáxias sem bojo a *redshifts* intermédios ($0.4 \leq z \leq 1$). O objetivo é o de contribuir para uma melhor compreensão destes objetos, ajudando no seu processo de caracterização. A amostra em estudo contém 14 131 galáxias com dados óticos provenientes de um levantamento levado a cabo pela câmara *Advanced Camera for Surveys* (ACS), a bordo do *Hubble Space Telescope* (HST), ao campo do *Cosmic Evolution Survey* (COSMOS). Este campo foi também observado por um conjunto amplo de observatórios espaciais e terrestres em múltiplos comprimentos de onda, entre os quais se destacam o VLA (rádio), o Chandra e XMM (raios-X) e o Spitzer (infravermelho), de particular interesse para este estudo.

Os resultados obtidos para as taxas de formação estelar mostram que as galáxias sem bojo podem apresentar taxas de formação estelar elevadas ($\sim 50 - 230 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$), embora a sua maioria apresente taxas de formação estelar muito baixas ($\sim 1 - 8 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$).

Estes números apoiam a tese de que a taxa de formação estelar é essencialmente dominada por interações entre galáxias. De acordo com estes modelos, não será de esperar que as galáxias sem bojo tenham sofrido muitas interações relevantes ao longo da sua existência, não se enquadrando bem no modelo vigente de formação e evolução hierárquica de estruturas, o chamado Λ CDM.

Foram também encontrados 108 candidatos a galáxias com núcleos galácticos ativos (AGN), o que contabiliza menos de 1% da população total de galáxias sem bojo em estudo. Esta baixa percentagem está de acordo com o facto de não ser esperado que existam muitas galáxias sem bojo com núcleos galácticos ativos, dadas as correlações empíricas que existem entre a massa dos buracos negros centrais das galáxias e os seus

bojos.

Palavras Chave: Galáxias sem Bojo, Taxas de Formação Estelar, Radiofrequência, Galáxias Ativas, Formação e Evolução de Galáxias.

Abstract

Bulgeless galaxies are very numerous in the Universe, and despite this observational evidence, they still constitute a problem to any model that attempts to recreate the mechanisms for galaxy formation and evolution across cosmic time. Our understanding of how these structures come to be in an Universe that, according to the current paradigms, follows a hierarchical assembly, is of paramount importance to present-day galaxy research.

We present in this dissertation a study of the star formation rates, at radio wavelengths, of bulgeless galaxies at intermediate redshifts ($0.4 \leq z \leq 1$). Our objective is to contribute to a better understanding of these objects by helping with their thorough characterization. The sample at study comprises 14 131 galaxies whose optical imaging comes from a survey conducted using the Advance Camera for Surveys (ACS) aboard of the Hubble Space Telescope (HST) in the Cosmic Evolution Survey (COSMOS) field. This field was also observed by a vast set of space and ground observatories in multiple wavelengths, which include the VLA (radio), the Chandra and XMM (X-rays) and Spitzer (infrared), of particular interest for this study.

Our final results regarding the star formation rates of bulgeless galaxies show they could reach up to high values ($\sim 50 - 230 M_{\odot} \text{year}^{-1}$), although the majority of them display very low levels ($\sim 1 - 8 M_{\odot} \text{year}^{-1}$) of star formation.

These numbers support the fact that galaxy star formation is essentially dominated by galaxy interactions. Accordingly to these models, it is not expected that bulgeless galaxies undergo many relevant interactions during their histories, which is hard to reconcile with our prevailing framework of galaxy formation and evolution, the so-called Λ CDM. We also found 108 Active Galactic Nuclei (AGN) candidates, which account for less than 1% of our total bulgeless galaxy sample. This small number is in agreement with the fact that not many bulgeless galaxies are expected to host an AGN, due to the empirical correlations that exist between the central Super Massive Black Holes (SMBHs) and their galaxies' bulges.

Keywords: Bulgeless Galaxies; Star Formation Rates, Radio Frequency, Active Galaxies, Galaxy Formation and Evolution.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
<i>Abstract</i>	ix
1 Introdução	1
1.1 Contexto científico	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da tese	3
2 Galáxias sem Bojo e Taxas de Formação Estelar	5
2.1 Classificação Morfológica de Galáxias	5
2.1.1 Classificação Visual	6
2.1.2 Classificação Quantitativa	7
2.2 Formação e Evolução de Galáxias	12
2.2.1 Formação de Estruturas	12
2.2.2 Formação de Discos	13
2.2.3 Formação de Bojos Galácticos e Elípticas	14
2.3 O Problema das Galáxias sem Bojo	16
2.4 Taxas de Formação Estelar	17
2.5 Núcleos Galácticos Ativos	21
2.5.1 Estrutura de um AGN	22
2.5.2 Emissão de um AGN	25
3 Seleção da Amostra	27
3.1 Uma amostra de galáxias sem bojo	27
3.2 Levantamentos em diversos comprimentos de onda	33
3.2.1 Rádio: VLA-COSMOS	33
3.2.2 Infravermelho: S-COSMOS e UltraVISTA	34
3.2.3 Raios-X: C-COSMOS	36

3.2.4	Correspondência entre catálogos	39
3.3	Identificação de Núcleos Galácticos Ativos	42
3.3.1	AGNs em radiofrequências	42
3.3.2	AGNs em raios-X	44
3.3.3	AGNs em infravermelho	47
3.4	A amostra final de galáxias sem bojo	49
4	A TFE de Galáxias sem Bojo	53
4.1	Galáxias sem bojo com detecção no rádio	53
4.2	Galáxias sem bojo sem detecção no rádio	55
5	Conclusões e Trabalho Futuro	61

Lista de Figuras

2.1	Sistema de classificação de Hubble.	7
2.2	Galáxia de Andrómeda observada em diferentes comprimentos de onda.	8
2.3	Variação de cor (B-V) com a classe morfológica.	8
2.4	Perfis de Sérsic para alguns valores de n	10
2.5	Índice de Sérsic em função da cor $(u-r)_c$ para uma amostra de 10 095 galáxias selecionadas do <i>Millenium Galaxy Catalogue</i>	11
2.6	Mapa da radiação cósmica de fundo.	13
2.7	Imagem de duas galáxias, uma com um pseudo-bojo e outra com um bojo clássico.	15
2.8	Imagem de uma galáxia sem bojo, a NGC 3621.	16
2.9	Imagem de duas galáxias em colisão.	18
2.10	Espectro, do rádio ao infravermelho longínquo, de uma galáxia normal.	20
2.11	Imagem de rádio de uma galáxia ativa com jatos e lobos.	23
2.12	Modelo da estrutura de um núcleo galáctico ativo.	24
2.13	Modelo de unificação para as galáxias ativas.	24
2.14	Distribuição espectral de energia para uma galáxia ativa e normal.	25
3.1	Mosaico do campo COSMOS, obtido com a camera ACS do HST	29
3.2	Distribuição espacial no campo COSMOS das 14 139 galáxias sem bojo	32
3.3	O <i>Very Large Array</i> (VLA) do <i>National Radio Astronomy Observatory</i> (NRAO).	33
3.4	O Telescópio Espacial Spitzer.	34
3.5	O <i>Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy</i> (VISTA).	35
3.6	Distribuição do número de fontes, no catálogo do UltraVISTA, em função da magnitude na banda K_s , medida na abertura de $2''$	36
3.7	O <i>Chandra X-ray Observatory</i>	37
3.8	Cobertura dos diversos levantamentos na região do COSMOS	38
3.9	Distribuição de probabilidade de correspondência	41
3.10	Luminosidade no rádio de galáxias sem bojo.	44
3.11	Luminosidade nos raios-X de galáxias sem bojo.	47
3.12	Emissão no infravermelho para diferentes tipos de galáxias.	48

3.13	Distribuição, no espaço de cores no infravermelho, das 1902 galáxias sem bojo com identificação simultânea em K_s , $4.5 \mu m$ e $8.0 \mu m$	50
3.14	Imagem de uma das fontes contaminantes na amostra de galáxias sem bojo.	50
4.1	Taxa de formação estelar no rádio de galáxias sem bojo com detecção no rádio.	54
4.2	Imagem final resultante do stacking em radiofrequências de 1976 galáxias sem bojo, no intervalo de <i>redshift</i> $[0.4 - 0.5[$	57
4.3	Taxa de formação estelar ($\Psi(M_{\odot} \text{ ano}^{-1})$) de galáxias sem bojo com detecção no rádio, e taxa de formação estelar médias de galáxias sem bojo sem detecção no rádio, em função do <i>redshift</i> (z).	58

Lista de Tabelas

3.1	Número de fontes presentes no catálogo-L de acordo com o campo em que foram detetadas e a sua classificação morfológica.	31
3.2	Número de fontes presentes no catálogo-B de acordo com a sua classificação morfológica.	31
3.3	Número de fontes presentes nos catálogos dos levantamentos do COSMOS antes e após os cortes efetuados.	38
3.4	Número de fontes resultantes das correspondências entre os catálogos de rádio, infravermelho e raios-X e o catálogo ótico de Griffith et al. (2012).	40
3.5	Número de fontes no catálogo-B com identificação no rádio, raios-X ou infravermelho.	40
3.6	Valores para os limites inferiores de luminosidade no catálogo <i>Joint Catalog</i> do VLA-COSMOS.	43
3.7	Valores para os limites inferiores de luminosidade no C-COSMOS. . . .	46
3.8	Número de fontes na amostra final de galáxias não ativas sem bojo a <i>redshifts</i> intermédios $0.4 \leq z \leq 1$	51
4.1	Valores médios, em intervalos de <i>redshift</i> (Δz), da taxa de formação estelar ($\langle \Psi \rangle$) para a amostra de 87 galáxias sem bojo com deteção no rádio.	55
4.2	Número (N) de galáxias sem bojo sem identificação no rádio, por intervalo de <i>redshift</i> (Δz).	56
4.3	Resultados do <i>stacking</i> da amostra de 13 936 galáxias sem bojo sem deteção no rádio.	57
4.4	Valores médios, em intervalos de <i>redshift</i> (Δz), da taxa de formação estelar média ($\langle \Psi \rangle$) para a amostra de galáxias sem bojo sem deteção no rádio.	59

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto científico

No paradigma atual de formação e evolução de estruturas no Universo (Λ -CDM), as galáxias crescem por fusões e interações com outras, num cenário puramente hierárquico (Benson, 2010). Por outro lado, algumas simulações numéricas mostram que o resultado da fusão entre duas galáxias (de qualquer tipo) de massa comparável, dá origem à destruição de discos galácticos e à formação de estruturas esferoides como os bojos galácticos ou galáxias elípticas (por exemplo: Barnes, 2002; Bournaud et al., 2005; Springel & Hernquist, 2005; Robertson et al., 2006).

As galáxias sem bojo são galáxias formadas por um disco, cuja morfologia aparenta não possuir qualquer contribuição significativa de uma estrutura esferoide (bojo). Estas galáxias representam um problema para o cenário de formação de estruturas providenciado pelo paradigma Λ -CDM. O facto de as galáxias sem bojo não possuírem uma contribuição significativa de um esferoide, implica, segundo os modelos numéricos, que não terão passado por um grande número de interações/fusões relevantes desde a sua formação (Simmons et al., 2013). Assim sendo, a sua existência é difícil de explicar num cenário de formação e evolução de estruturas hierárquico. Seria de esperar então que as galáxias sem bojo fossem, neste cenário, casos isolados e que representassem uma pequena percentagem da população total de galáxias no Universo. Contudo, verifica-se que estas galáxias são muito abundantes, chegando mesmo a compreender $\sim 50\%$ das galáxias detetadas em levantamentos no ótico (Griffith et al., 2012).

Para além disto, as galáxias sem bojo não conseguiram ainda ser totalmente bem reproduzidas em simulações numéricas no contexto do modelo Λ -CDM. Algumas destas foram capazes de reproduzir com sucesso diversas propriedades dos discos de galáxias (Firmani & Avila-Reese, 2000; van den Bosch, 2000). Contudo, nestas simulações, as galáxias sem bojo acabam por se formar com tamanhos inferiores aos observados, são mais densas e possuem momentos angulares inferiores (D’Onghia & Burkert, 2004).

As galáxias sem bojo tornam-se ainda mais intrigantes quando temos em conta as correlações empíricas que existem entre a massa dos buracos negros no centro das galáxias, e as propriedades destas. Por exemplo, Ferrarese & Merritt (2000) e Tremaine et al. (2002) mostram que existe uma correlação próxima entre a massa do buraco negro central e a dispersão de velocidades das estrelas que formam o bojo. A massa do buraco negro também está correlacionada com a luminosidade do bojo (Kormendy, 1993; Magorrian et al., 1998) e a sua massa (por exemplo, Marconi & Hunt, 2003 e Häring & Rix, 2004). Tendo em conta estas correlações, é de esperar que a formação e evolução destas componentes (bojo e buraco negro) estejam de alguma forma interligadas, e não seria de esperar que uma galáxia sem bojo possuísse, por exemplo, um núcleo galáctico ativo, dado que não possui um bojo. Contudo, verifica-se a existência de núcleos galácticos ativos em galáxias sem bojo, que é resultado da presença de um buraco negro de grande massa no centro destas galáxias.

Tendo em conta o descrito anteriormente, as galáxias sem bojo são objetos cujo estudo é de extrema importância. A compreensão de como estas estruturas podem existir num Universo onde, segundo os modelos atuais, a formação e evolução de estruturas se procede de forma hierárquica, é crucial para o estudo na área de formação e evolução de galáxias.

Ao longo desta dissertação será usado $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.27$ e $\Omega_\Lambda = 0.73$ (Larson et al., 2011).

1.2 Objetivos

Reconhecendo a importância das galáxias sem bojo para o estudo da formação e evolução de galáxias, a comunidade científica tem estudado amplamente estes objetos nos últimos anos. Atualmente existem diversos estudos desenvolvidos tendo esta população como alvo (por exemplo: D’Onghia & Burkert, 2004; Simmons et al., 2013; Bizzocchi et al., 2014).

O objetivo desta tese é de contribuir para se atingir um melhor conhecimento acerca das galáxias sem bojo, ajudando no processo de caracterização destes objetos. Este trabalho é focado na caracterização das taxas de formação estelar destas galáxias a *redshifts* intermédios $0.4 \leq z \leq 1$. Estas taxas de formação estelar são estimadas a partir de radiofrequências, com o objetivo de se evitar os efeitos de extinção causados devido à presença de poeira.

O estudo da taxa de formação estelar das galáxias sem bojo, pode-nos fornecer informação acerca da sua formação e evolução, dado que taxas de formação estelar elevadas num galáxia, podem significar que esta se encontra em interação com outra. Como tal, e para o caso específico das galáxias sem bojo, não é de esperar que estas possuam um valor muito elevado para estas taxas, tendo em conta aquilo que sabemos acerca do

resultado de colisões entre galáxias.

Para além disto, os processos necessários envolvidos na estimativa das taxas de formação estelar de um galáxia, permite-nos identificar e quantificar a quantidade de galáxias ativas existentes nesta população.

1.3 Estrutura da tese

Após esta breve introdução do contexto científico e objetivos desta dissertação, segue-se um capítulo dedicado às galáxias sem bojo e taxas de formação estelar. Começaremos por falar sucintamente da morfologia das galáxias e de como estas podem ser separadas em diferentes classes de acordo com as suas características aparentes. Posteriormente, será descrito de forma sumária e em linhas gerais, alguns resultados do estudo de formação de estruturas no Universo. De seguida são apresentados alguns métodos para a estimativa de taxas de formação estelar em galáxias e, no término do capítulo, realizaremos sumariamente uma descrição de galáxias ativas e como estas se diferenciam de uma galáxia normal.

No terceiro capítulo, é descrita a metodologia utilizada, que deu origem à seleção de uma amostra de galáxias sem bojo com as características necessárias ao estudo da sua taxa de formação estelar em radiofrequências. Esta metodologia, inclui a identificação e remoção da amostra de galáxias com núcleos galácticos ativos.

No quarto capítulo, são apresentadas as estimativas das taxas de formação estelar para as galáxias sem bojo presentes na amostra em estudo, e a metodologia utilizada para as obter.

Finalmente, no último capítulo, são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho realizado, providenciando uma perspetiva de trabalho futuro que pode ser realizado tendo em conta os resultados obtidos nesta dissertação.

Capítulo 2

Galáxias sem Bojo e Taxas de Formação Estelar

Até à década de 1920 os astrónomos desconheciam a verdadeira natureza das galáxias, sendo que uma grande parte acreditava que estas seriam "nebulosas" pertencentes à Via Láctea. A dimensão da nossa galáxia ainda era tema de discussão, assim como a possibilidade destas "nebulosas" possuírem uma natureza extra-galáctica. Estes dois temas estiveram em debate no encontro anual da Academia Nacional Americana de Ciências que teve lugar em Washington DC em 26 de abril de 1920. Embora não tenha sido possível chegar a uma conclusão definitiva, este debate ficou conhecido na história da Astronomia como o "Grande Debate".

Cinco anos depois, no mesmo encontro anual, a 1 de janeiro de 1925, Edwin Hubble anunciou que uma das "nebulosas", a galáxia de Andrómeda, se encontrava a uma distância tal que a colocaria fora da Via Láctea, tendo em conta as dimensões desta última. Esta descoberta veio colocar um ponto final no debate ainda em decurso e afirmar a natureza extra-galáctica de algumas das nebulosas observadas. A descoberta de Hubble marcou o início da astronomia extra-galáctica que, neste contexto, é um ramo da astronomia relativamente recente.

2.1 Classificação Morfológica de Galáxias

Atualmente estima-se que existam milhares de milhões de galáxias espalhadas por todo o Universo observável. Estes objetos possuem propriedades diversas, tais como formas e estruturas aparentes. Hubble, tendo acesso a um grande número de dados de galáxias já identificadas na altura, criou o primeiro sistema de classificação de galáxias a obter uma grande aceitação (Hubble, 1926). Este sistema, embora tenha sofrido diversos acrescentos e modificações ao longo dos anos (por exemplo: de Vaucouleurs, 1959), continua a ser amplamente usado na astronomia extra-galáctica.

2.1.1 Classificação Visual

A classificação de Hubble tem como base a morfologia aparente de galáxias no visível, ou seja, as galáxias são divididas em diferentes classes de acordo com a forma e estrutura que aparentam ter na banda do visível. De forma a determinar a que classe uma galáxia pertence, são tidas em conta várias características: regularidade e simetria, presença de um disco, braços espirais e a distribuição da intensidade da luz ao longo da galáxia.

Tendo em conta a análise destas características, as galáxias no sistema de Hubble estão distribuídas em quatro classes principais: elípticas (E), lenticulares (S0), espirais (S) e irregulares (Irr). As galáxias espirais são divididas em duas subclasses, de acordo com a presença ou ausência de uma barra. As galáxias elípticas e espirais são ainda subclassificadas em termos de excentricidade e abertura dos braços, respetivamente. De seguida, podemos ver uma breve descrição, quanto às suas características morfológicas, de cada uma das classes de galáxias do sistema de classificação revisto de Hubble.

Elípticas Tal como o seu nome indica, estas galáxias são caracterizadas pela sua forma elíptica e, geralmente, ausência de estrutura aparente. A distribuição superficial de luz nestas galáxias é altamente concentrada no centro e decresce à medida que a distância ao centro da galáxia aumenta. Na classificação de Hubble, as galáxias elípticas assumem um índice n (E_n com $n = 10(1 - b/a)$) que representa as suas elipticidades aparentes. Uma galáxia E_1 será menos elíptica que uma galáxia E_7 , logo quanto maior for este índice, mais elíptica a galáxia será.

Espirais Ao contrário das galáxias elípticas, as espirais possuem uma distribuição superficial de luz muito menos concentrada. Estas galáxias possuem um disco com braços espirais e uma estrutura esferoide central designada por bojo. A abertura dos braços espirais e a dimensão do bojo relativamente ao disco dão origem a subclasses na classificação de Hubble - S_a, S_b, S_c . Galáxias com braços mais fechados e bojos maiores relativamente ao disco são denominadas por S_a enquanto que galáxias com braços mais abertos e bojos mais pequenos relativamente ao disco recebem a nomenclatura de S_c . Algumas galáxias espirais também apresentam estruturas centrais semelhantes a barras e, por isso, para estas, a nomenclatura é semelhante à apresentada anteriormente - SB_a, SB_b, SB_c .

Lenticulares As galáxias lenticulares possuem uma estrutura semelhante às galáxias espirais, com a presença de um bojo e disco, embora sem braços espirais. O bojo destas galáxias pode assumir uma forma esferoide (S0) ou, como verificado posteriormente ao esquema de classificação proposto inicialmente por Hubble, uma forma alongada semelhante a uma barra (SB0).

Irregulares As galáxias irregulares apresentam poucos sinais de simetria ou regularidade na sua morfologia. No entanto, algumas destas galáxias apresentam sinais de uma barra central ou vestígios de braços espirais.

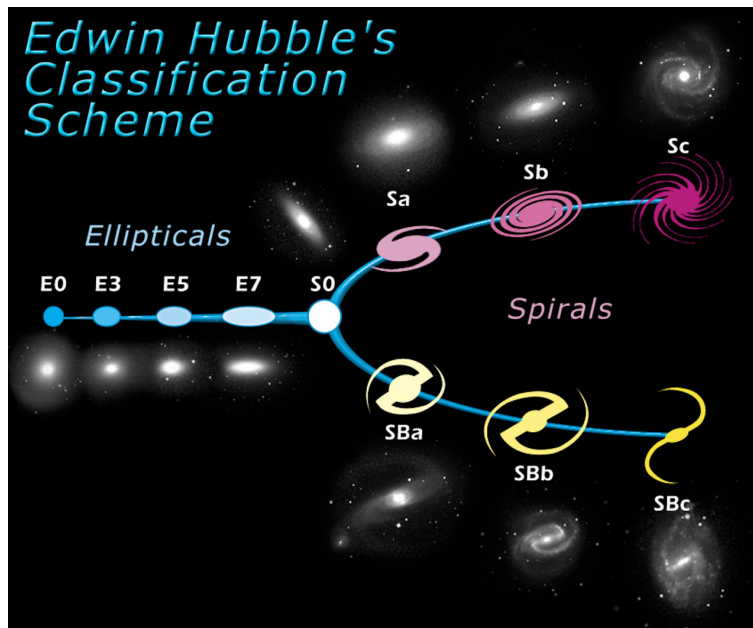


Figura 2.1: Sistema de classificação de Hubble. Créditos: NASA e ESA.

O sistema de classificação de Hubble (figura 2.1) possui algumas desvantagens. Uma destas é o facto de a classificação visual poder ser subjetiva, dado que diferentes observadores poderão atribuir diferentes classes a uma mesma galáxia. Por outro lado, dado que a morfologia é classificada no visível, a classificação não pode ser aplicada em outros comprimentos de onda, visto que as galáxias possuem aparências diferentes consoante o comprimento de onda em que são observadas (figura 2.2).

Apesar das suas desvantagens, este sistema demonstrou ser muito útil na classificação morfológica de galáxias. Nomeadamente, é possível verificar que algumas propriedades das galáxias estão correlacionadas com a sua classificação ao longo da sequência de Hubble. Dois exemplos destas correlações são a cor e a fração de massa da galáxia na forma gás e poeira. Podemos ver na figura 2.3 a relação entre morfologia e cor ($B - V$) onde é visível que as galáxias *E* e *S0* são mais vermelhas que as *S* e *Irr*. As galáxias elípticas e lenticulares apresentam também em geral, uma menor fração de massa de poeira e gás atómico e molecular, relativamente às galáxias espirais e irregulares.

2.1.2 Classificação Quantitativa

Desde que Hubble criou o seu sistema de classificação morfológica de galáxias, tiveram lugar grandes avanços tecnológicos que permitiram a obtenção de imagens de um número cada vez maior destes objetos. Levantamentos como o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) com espectros e imagens de aproximadamente um milhão de galáxias, fizeram com que as amostras em estudo passassem de algumas centenas de objetos para vários



Figura 2.2: Galáxia de Andrômeda observada em diferentes comprimentos de onda: visível, infravermelho e raios-X. No canto inferior esquerdo podemos observar uma imagem composta dos três comprimentos de onda. A imagem no centro, é a combinação das imagens obtidas no infravermelho e raios-X. Créditos: infravermelho: ESA/Herschel/PACS/SPIRE/J. Fritz, U. Gent; raios-X: ESA/XMM-Newton/EPIC/W. Pietsch, MPE; visível: R. Gendler.

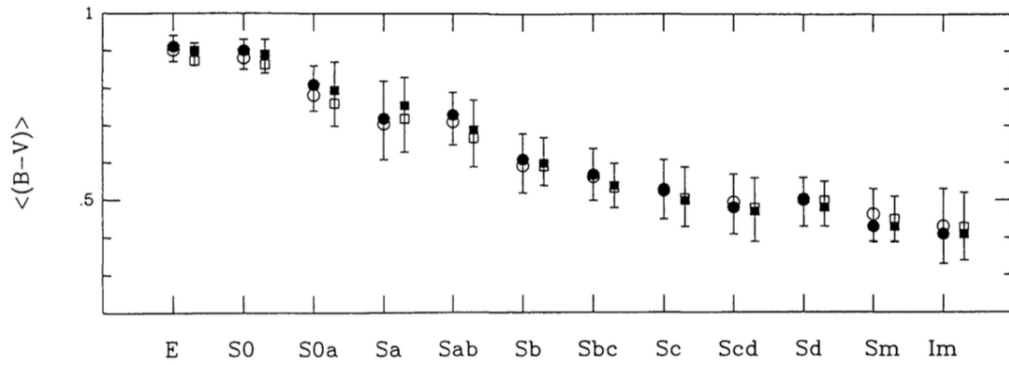


Figura 2.3: Variação de cor (B-V) com a classe morfológica, para uma extensão da classificação original de Hubble. É possível verificar que as galáxias *E* e *S0* são mais vermelhas que as *S* e *Im*. Créditos: Roberts & Haynes (1994).

milhões. Perante tal quantidade de dados, a tarefa de classificação morfológica visual torna-se virtualmente impossível, ou pelo menos muito demorada e exaustiva.

Esta foi uma das razões que levou à criação de métodos automáticos de classificação morfológica de galáxias, baseados no estudo da distribuição de luz nestes objetos. Os métodos mais comuns baseiam-se na modelação desta distribuição de luz por funções analíticas, assumindo um modelo a priori. Em 1948, de Vaucoulers propôs uma expressão analítica empírica que descreve bem a distribuição do brilho superficial de galáxias elípticas e dos bojos das galáxias espirais (de Vaucouleurs, 1948). Esta lei, também conhecida por lei $r^{1/4}$ toma a forma:

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -7.67 \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right) \right\} \quad (2.1)$$

onde r_e é o raio efetivo até onde metade da luminosidade total é emitida e I_e é o brilho de superfície efetivo, ou seja, o brilho de superfície em r_e .

Mais tarde, foi também verificado (de Vaucouleurs, 1958; Freeman, 1970) que os perfis radiais de brilho superficial de discos de galáxias espirais e lenticulares são bem descritos pela expressão:

$$I(r) = I_0 \exp \left(\frac{-r}{r_s} \right) \quad (2.2)$$

onde I_0 é o brilho extrapolado para o centro do disco e r_s é a escala de distância do disco, ou seja, a distância entre o centro do disco e o ponto onde o brilho decresce por um fator de $1/e$.

Em 1968, Sérsic formulou uma expressão empírica (Sérsic, 1968), que pode ser vista como uma generalização da lei de de Vaucouleurs, que mostrou ser uma forma conveniente de combinar a distribuição de luz superficial de galáxias elípticas e espirais. A expressão de Sérsic é dada por:

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -b_n \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \right\} \quad (2.3)$$

onde r_e é o raio efetivo até onde metade da luminosidade total da galáxia é emitida, I_e é o brilho de superfície efetivo, ou seja, o brilho de superfície em r_e , b_n é um parâmetro de normalização que garante que metade da luminosidade total provem de r_e e n é o índice de Sérsic.

Foram desenvolvidas expressões analíticas para o parâmetro b_n , como por exemplo por Ciotti & Bertin (1999). É possível verificar que para os índices de Sérsic $n = 1$ e $n = 4$ a expressão empírica de Sérsic resulta, respetivamente, na lei exponencial para a

distribuição de brilho superficial dos discos de galáxias espirais, e na lei de de Vaucouleurs para a distribuição de brilho superficial das galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais. Na figura 2.4 podem-se observar os perfis de brilho superficial de Sérsic para alguns valores de n .

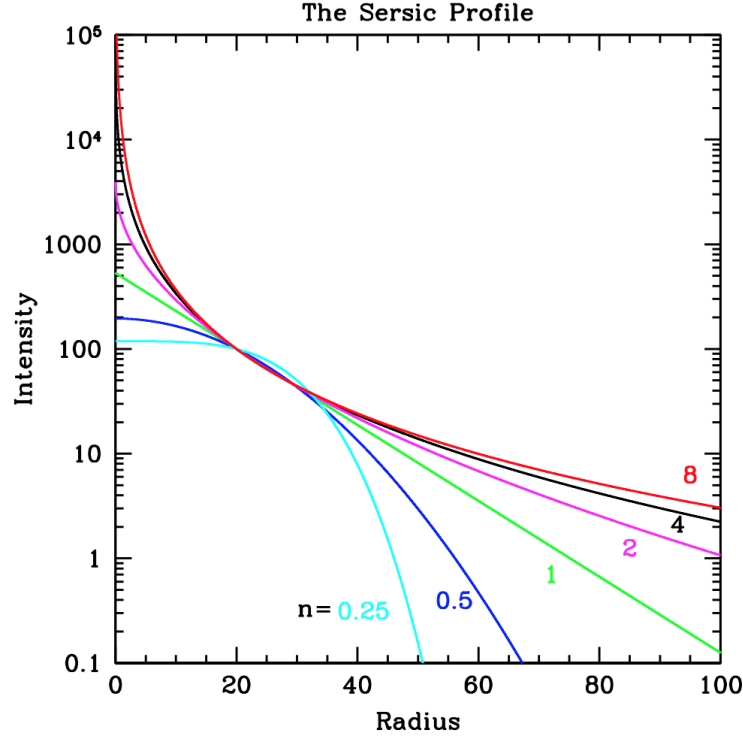


Figura 2.4: Perfis de Sérsic para alguns valores de n . Créditos: Peng (2003).

Um estudo realizado a uma amostra de 10 095 galáxias selecionadas do *Millenium Galaxy Catalogue* (Driver et al., 2006), mostra que o formalismo de Sérsic é um bom indicador de tipo de morfologia, podendo dividir amostras de um grande número de galáxias em dois tipos distintos: dominadas por esferoides e dominadas por discos. Isto pode ser inferido pela figura 2.5 onde se pode ver claramente uma separação da amostra em duas populações distintas. Uma destas populações encontra-se centrada em $n \sim 1$, correspondendo a populações de galáxias dominadas por discos (espirais) e a outra está centrada em $n \sim 4$ o que corresponde a uma população de galáxias elípticas, dominadas por componentes esferoides.

Tal como foi referido, os perfis de luminosidade da maioria das galáxias espirais são bem descritos por um modelo exponencial (equação (2.2)). Contudo, para distâncias radiais (r) pequenas verifica-se que a distribuição de brilho superficial destas galáxias é significativamente superior àquela prevista pela lei exponencial. Em geral, este brilho

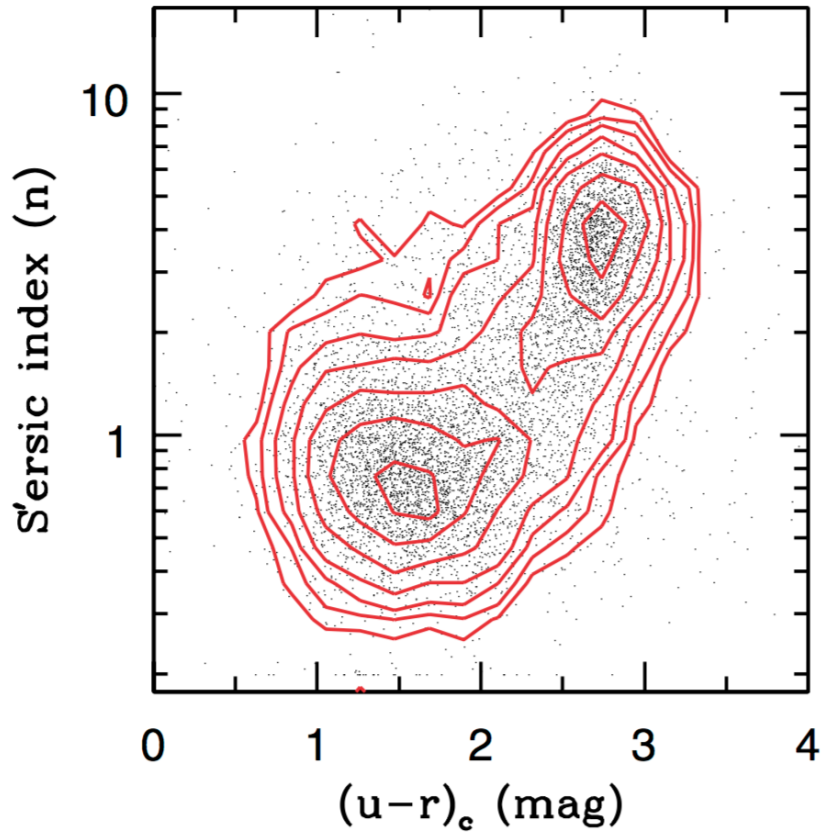


Figura 2.5: Índice de Sérsic em função da cor $(u-r)_c$ para uma amostra de 10 095 galáxias selecionadas do *Millenium Galaxy Catalogue*. É possível ver que existe uma separação entre galáxias mais vermelhas (dominadas por esferoides) e galáxias mais azuis (dominadas por discos). O eixo dos yy encontra-se em escala logarítmica. Créditos: Driver et al. (2006).

adicional deve-se à presença de uma estrutura esferoide no centro de muitas galáxias espirais - o bojo. O perfil de luminosidade desta estrutura, à semelhança das galáxias elípticas, pode ser também descrito pela lei de de Vaucouleurs (equação (2.1)). Desta forma, é razoável ajustar um modelo que é a soma de duas componentes: uma lei exponencial para o disco e de de Vaucouleurs para o bojo.

2.2 Formação e Evolução de Galáxias

A formação e evolução de galáxias é ainda hoje um tópico de estudo intenso. A compreensão de como as estruturas que observamos atualmente no Universo se formaram, encontra-se ainda envolta por várias questões para as quais ainda não temos respostas. Nos últimos anos foram desenvolvidos alguns modelos capazes de simular alguns destes processos, mas não conseguem explicar e estar completamente de acordo com alguns dados observacionais.

2.2.1 Formação de Estruturas

Atualmente, o modelo de formação de estruturas com maior aceitação por parte da comunidade científica é o chamado Modelo de Matéria Escura Fria com constante cosmológica (Λ), ou Modelo Λ CDM (do inglês, Λ -Cold Dark Matter). Neste, pequenas flutuações de densidade na distribuição, aproximadamente homogênea, de matéria no Universo primordial, terão crescido por instabilidade gravitacional dando origem a estruturas com dimensões sub-galácticas. Estas flutuações de densidade na distribuição de matéria no Universo primordial estão patentes no mapa da radiação cósmica de fundo, que pode ser observado na figura 2.6.

No modelo cosmológico de Λ CDM, a matéria escura domina o conteúdo de matéria no Universo, com a matéria bariônica a representar apenas uma pequena fração da massa total. Assumindo que esta proporção se tenha mantido aproximadamente igual desde os primórdios do Universo, espera-se que a matéria escura tenha tido um papel predominante na formação de estruturas, com a matéria bariônica a desempenhar um papel secundário. Assim sendo, as primeiras estruturas a serem formadas, por instabilidade gravitacional, resultantes das flutuações de densidade primordiais, terão sido halos de matéria escura. A matéria bariônica terá sido posteriormente "arrastada" para o interior dos halos de matéria escura, por ação da força gravítica destes, concentrando-se no centro dos seus poços de potencial gravítico e dando origem à componente visível das galáxias que conseguimos observar (Benson, 2010). Segundo este modelo, os halos, e consequentemente as galáxias, terão crescido através de fusões e acreções de outros halos. Este é o cenário de formação de estruturas providenciado pelo modelo Λ CDM, um cenário de formação de estruturas hierárquico no qual estruturas maiores crescem a partir da fusão e acreção de outras mais pequenas.

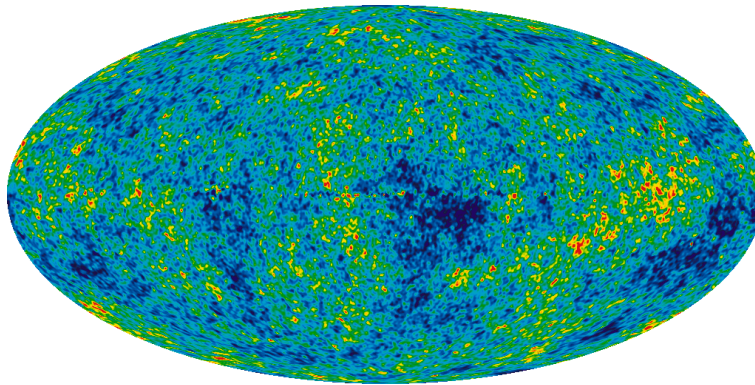


Figura 2.6: Mapa da radiação cósmica de fundo, obtido pela Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). O mapa mostra pequenas flutuações de temperatura na ordem de 1 para 100 000 ao longo do céu, refletindo pequenas variações de densidade no Universo primordial. Créditos: NASA/WMAP Science Team.

Uma vez que o modelo Λ CDM consegue explicar (de uma forma quase satisfatória, veremos mais à frente porquê) a formação de estruturas no Universo, a pergunta que nos podemos colocar agora é a de quais os processos que dão origem à formação da diversidade de galáxias que conseguimos observar hoje em dia. Nas secções seguintes, será abordado sucintamente o que acontece à matéria bariónica quando cai para o interior dos halos de matéria escura, e como as interações entre estes halos podem dar origem a diferentes tipos de galáxias.

2.2.2 Formação de Discos

Os halos de matéria escura possuem um momento angular originado pelo torque gravitacional das estruturas circundantes (Benson, 2010). De acordo com Hoyle (1949), o momento angular da matéria bariónica é adquirido da mesma forma (van den Bosch et al., 2002).

A formação de discos galácticos tem origem na conservação do momento angular do gás bariónico que se encontra em colapso gravitacional nos halos de matéria escura. Este colapso acaba por ser suspenso pelo suporte rotacional do próprio disco.

De forma a tentar simular a formação destas estruturas, foram realizadas algumas simulações que mostraram que o momento angular do gás bariónico não se conservava durante o colapso. Segundo estas simulações, uma fração significativa do momento angular é perdida durante o processo, resultando em galáxias demasiado pequenas para as observações realizadas (Navarro & White, 1994; Navarro et al., 1995).

Para que se formem discos de tamanho comparáveis aos observados, o gás não pode perder uma quantidade significativa de momento angular. Modelos posteriores inclui-

ram a existência de um processo de *feedback* que provavelmente seria responsável pela conservação aproximada do momento angular (Thacker & Couchman, 2001; Steinmetz & Navarro, 2002). Este processo de feedback, que pode aumentar o momento angular do gás por um fator de 3-5 (Benson, 2010) é originado, por exemplo, por explosões de supernovas que conseguem produzir torques gravitacionais muito fortes. Outras simulações mostraram que efetivamente um feedback mais forte leva à formação de uma galáxia dominada por um disco e, caso contrário, à formação de uma galáxia dominada por um esferoide (Zavala et al., 2008).

Um dos tópicos de investigação atuais é o de compreender os processos que levam a que os discos das galáxias possuam uma espessura, ou seja, uma extensão vertical. Acredita-se que este fenómeno tenha origem em um ou mais processos que podem ser internos ou externos à própria galáxia. Como exemplo de um processo interno, temos a dispersão de estrelas, por ação de forças de maré de nuvens moleculares escuras, que dá origem a movimentos perpendiculares ao plano do disco (Spitzer & Schwarzschild, 1953; Lacey, 1984). Como exemplo de um processo externo, temos a acreção pela galáxia de pequenos sistemas estelares que vão contribuir para aumentar a espessura do disco (Abadi et al., 2003; Villalobos & Helmi, 2008).

As galáxias com disco podem conter estruturas como braços espirais e barras nucleares. Acredita-se que os braços espirais são o resultado de uma onda de densidade que se move através do disco da galáxia (Lin & Shu, 1964; Pour-Imani et al., 2016) e as barras são originadas por instabilidades no próprio disco (Benson, 2010).

2.2.3 Formação de Bojos Galácticos e Elípticas

Atualmente é realizada uma distinção entre os dois tipos de bojo que podemos encontrar no interior de galáxias: bojos clássicos e pseudo-bojos. Os bojos clássicos, tal como as galáxias elípticas, possuem uma forma esferoide e uma distribuição de luz que pode ser bem modelada com um perfil de Sérsic, com $n \sim 4$. A população de estrelas que formam os bojos clássicos, em geral, é formada por estrelas velhas que possuem órbitas aleatórias em relação ao plano da galáxia. Estas estruturas possuem pouco gás e uma taxa de formação estelar baixa, ou mesmo inexistente.

Ao contrário dos bojos clássicos, os pseudo-bojos possuem uma estrutura mais achatada e a sua distribuição de luz é mais semelhante à de um disco, podendo ser relativamente bem modelada com um perfil de Sérsic, com $n \lesssim 2$. Alguns pseudo-bojos chegam mesmo a revelar a presença de sinais de estruturas espirais e barras. As órbitas das suas estrelas processam-se aproximadamente no mesmo plano que o do disco da galáxia. Quando comparados com os bojos clássicos, os pseudo-bojos possuem populações estelares mais jovens e formação estelar ativa.

Teoriza-se que estes dois tipos de bojos galácticos também diferem na forma como foram formados, com os bojos clássicos a serem formados através da fusão entre galáxias e os pseudo-bojos através de processos evolutivos seculares do disco galáctico

(Kormendy & Kennicutt, 2004).

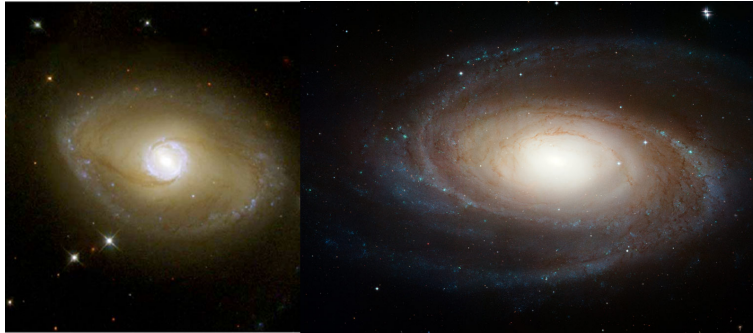


Figura 2.7: A galáxia à esquerda é a NGC 6782 e possui um pseudo-bojo, enquanto que a da direita (M81) possui um bojo clássico. Créditos das imagens de ambas as galáxias: NASA, ESA e Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

O resultado da fusão de duas galáxias pode variar consoante a massa e a fração de gás de cada um dos objetos em colisão. De acordo com alguns modelos, quando duas galáxias com uma razão entre massas $\geq 25\%$ se fundem, independentemente do seu tipo, qualquer disco galáctico pré existente é destruído, resultando desta fusão uma galáxia elíptica (Bournaud et al., 2005). Isto ocorre através de um processo, ainda pouco compreendido, de relaxamento violento (Lynden-Bell, 1967) em que as órbitas das estrelas contidas no plano do disco de uma ou mais galáxias em colisão, podem tornar-se aleatórias. Apesar disto, quando as galáxias em colisão possuem uma elevada fração de gás, isto pode dar origem à formação de um novo disco após a fusão (Barnes, 2002; Springel & Hernquist, 2005; Robertson et al., 2006). No caso da fusão entre galáxias com uma razão entre massas inferior a 25% e até 10%, o processo tende a não destruir os discos e pode levar à criação de um bojo clássico (Benson, 2010). Para razões de massa inferiores a 10% o processo tende a deixar o disco intacto e a não formar um bojo (Hopkins et al., 2011; Simmons et al., 2013).

De acordo com as teorias atuais, os pseudo-bojos são formados por processos seculares que resultam de fenómenos que envolvem, por exemplo, a interação de gás e estrelas com estruturas como as barras ou os braços espirais. Neste cenário, é possível ocorrer, por exemplo, uma redistribuição de massa e momento angular nas galáxias, originada pelas suas barras centrais. Este fenómeno dá origem a uma concentração de matéria no centro da galáxia, aumentando a densidade de gás e poeira. Isto leva a formação de estrelas no centro da galáxia e à criação de um pseudo-bojo (Benson, 2010). A forma e os detalhes de como este processo decorre, é ainda tópico de estudo (Bournaud & Combes, 2002; Shen & Sellwood, 2004).

2.3 O Problema das Galáxias sem Bojo

Nas últimas três secções, foram explicitados alguns dos resultados que conseguem explicar de forma razoavelmente satisfatória a origem das estruturas que observamos hoje em dia no Universo. Porém, existe um tipo de galáxia cuja origem ainda não conseguiu ser totalmente bem explicada no modelo Λ CDM. Estamos a falar de galáxias que apresentam na sua morfologia apenas um disco, não possuindo qualquer contribuição significativa de um bojo e que são designadas coletivamente por galáxias sem bojo.



Figura 2.8: Imagem de uma galáxia sem bojo, a NGC 3621. Créditos: ESO.

A morfologia destas galáxias implica que não deverão ter sofrido fusões relevantes, ou seja, com razões de massa acima dos 10% (Hopkins et al., 2011; Simmons et al., 2013). No contexto do modelo Λ CDM, as galáxias crescem por fusões com outras e, como vimos, a fusão entre duas galáxias de massa comparável dá origem a uma componente esferoide. Isto leva a crer que as galáxias sem bojo terão passado apenas por interações menores ao longo da sua existência, o que faria com que fosse necessário um número demasiado elevado destas interações para reproduzir a formação destes objetos. Por este motivo, não seria de esperar encontrarmos galáxias sem estas componentes na sua morfologia, ou pelo menos seria de esperar que não fossem objetos comuns. No entanto, verifica-se que estas galáxias são muito abundantes nos levantamentos profundos efetuados até à data, chegando mesmo a compreender $\sim 50\%$ das galáxias detetadas nestes levantamentos (por exemplo, Griffith et al., 2012).

Para além disto, as galáxias sem bojo não conseguiram ainda ser totalmente bem reproduzidas em simulações numéricas no contexto do modelo Λ CDM. Algumas destas foram capazes de reproduzir com sucesso diversas propriedades dos discos de galáxias

(Firmani & Avila-Reese, 2000; van den Bosch, 2000). Contudo, as galáxias sem bojo acabam por se formar com tamanhos inferiores aos observados, são mais densas e possuem momentos angulares inferiores (D’Onghia & Burkert, 2004).

Para além do problema que as galáxias sem bojo representam no contexto da formação hierárquica de estruturas, estes objetos tornam-se ainda mais intrigantes quando temos em conta as correlações empíricas que existem entre a massa dos buracos negros no centro das galáxias, e as propriedades destas. Por exemplo, Ferrarese & Merritt (2000) e Tremaine et al. (2002) mostram que existe uma correlação próxima entre a massa do buraco negro central e a dispersão de velocidades das estrelas que formam o bojo. A massa do buraco negro também está correlacionada com a luminosidade do bojo (Kormendy, 1993; Magorrian et al., 1998) e a sua massa (por exemplo, Marconi & Hunt, 2003 e Häring & Rix, 2004). Tendo em conta estas correlações, é de esperar que a formação e evolução destas componentes (bojo e buraco negro) estejam de alguma forma interligadas, e não seria de esperar que uma galáxia sem bojo possuísse, por exemplo, um núcleo galáctico ativo, dado que não possui um bojo. Contudo, verifica-se a existência de núcleos galácticos ativos em galáxias sem bojo que, como veremos mais adiante, é resultado da presença de um buraco negro de grande massa no centro destas galáxias.

2.4 Taxas de Formação Estelar

Segundo as teorias atuais, as estrelas são formadas pelo colapso gravitacional de grandes nuvens densas e frias de gás e poeira, denominadas por nuvens moleculares. Estas nuvens mantêm-se em equilíbrio hidrostático enquanto existe um balanço entre a sua energia cinética (K) e a sua energia potencial gravítica (U) - teorema do virial ($2K + U = 0$). Se as partículas que constituem a nuvem possuírem pouca energia cinética, a nuvem colapsa. Em oposição, se a energia cinética interna for alta, a força devido à pressão do gás será superior à força gravítica e a nuvem expande. Existe um valor de massa (massa de Jeans - M_J) que estabelece o limite a partir do qual uma nuvem de massa M_n expande ($M_n < M_J$) ou colapsa ($M_n > M_J$) e que é dado por:

$$M_J \simeq \left(\frac{5kT}{G\mu m_h} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho_0} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

onde k é a constante de Boltzman, T a temperatura, G a constante gravitacional, μ o peso molecular médio, m_h é a massa do hidrogénio e ρ_0 a densidade da nuvem.

Como podemos constatar, a massa de Jeans depende da temperatura e da densidade da nuvem. O colapso de uma nuvem molecular escura em equilíbrio hidrostático pode ser desencadeado de forma espontânea ou por outros processos que podem comprimir a nuvem. Dois destes processos são internos à galáxia, como é o caso da colisão entre

nuvens moleculares escuras ou uma explosão de supernova na vizinhança da nuvem, que pode gerar ondas de choque que a comprimem. Um outro processo, externo à galáxia, tem lugar na interação entre galáxias. Neste, as nuvens de gás em ambas as galáxias são comprimidas pelas forças de maré associadas ao evento, podendo mesmo despoletar taxas de formação estelar elevadas (Sanders et al., 1988; Bell et al., 2006; Jogee et al., 2009). A maioria das galáxias com grandes taxas de formação estelar são galáxias em interação (Bournaud, 2011; Kennicutt et al., 2012). Na figura 2.9 podemos observar um exemplo de duas galáxias em interação com taxas de formação estelar elevadas.



Figura 2.9: Imagem das galáxias Antenas, um exemplo de duas galáxias em colisão. A azul, podemos ver as regiões iluminadas por estrelas jovens e de grande massa, que são indicativas de formação estelar ativa e/ou recente. Créditos: NRAO/AUI.

O estudo da taxa de formação estelar de uma galáxia pode-nos dar informações acerca da sua formação e evolução. Por exemplo, uma galáxia com uma taxa de formação estelar muito elevada pode significar que se encontra em interação com outra. No caso das galáxias sem bojo, e tendo em conta aquilo que sabemos do resultado de colisões entre galáxias, não será de esperar que tenham taxas de formação estelar muito elevadas, pois estas galáxias não deverão ter passado por muitas interações maiores ao longo da sua vida.

De forma a tentar compreender melhor as galáxias sem bojo, neste trabalho é realizado um estudo das taxas de formação estelar (TFE) destes objetos. Para tal, é necessário compreender como é que conseguimos analisar tais taxas a partir da luz emitida pelas galáxias.

Existem diversas formas de estimar a TFE de uma galáxia utilizando diferentes processos. Contudo, todos os processos baseiam-se no mesmo princípio - identificar indi-

cadores que quantifiquem a quantidade de estrelas que foram recentemente formadas. A melhor forma de realizar esta quantificação é através de estrelas de grande massa do tipo O e B. Dado que estas estrelas possuem tempos de vida curtos ($\sim 6 \times 10^6$ anos, para o caso das estrelas O e $\sim 3.5 \times 10^8$ anos para o caso das estrelas B - Calzetti, 2013), a sua presença numa galáxia fornece a indicação de que se está perante formação estelar ativa ou recente. Devido às suas temperaturas elevadas, as estrelas O e B emitem a maioria da sua radiação na zona do ultravioleta, dominando o espectro de uma galáxia normal nesta banda do espectro eletromagnético. No que se segue, será realizado um breve sumário de algumas das formas de estimar a TFE de uma galáxia.

Uma das formas de quantificar a TFE numa galáxia é medindo a quantidade de luz ultravioleta que esta galáxia emite, o que deverá refletir à partida a quantidade de estrelas de grande massa contidas na galáxia. Contudo, estimar as TFE utilizando a emissão ultravioleta como indicador possui um grande constrangimento.

Tal como foi referido anteriormente, a formação de estrelas ocorre em regiões densas e ricas em poeira e gás, como é o caso das nuvens moleculares. As galáxias em geral possuem poeira na sua constituição sendo que aquelas com formação estelar ativa apresentam em geral grandes quantidades (Calzetti, 2013). A presença de poeira nestas galáxias faz com que exista um obscurecimento da radiação emitida visto que vai dispersar ou absorver a radiação incidente. A secção eficaz de absorção da poeira é maior para comprimentos de onda menores, com um pico forte no ultravioleta. Assim, quanto menor for o comprimento de onda da radiação incidente maior será a absorção pela poeira. Por este motivo, a luminosidade nos ultravioletas pode fornecer uma subestimação da verdadeira TFE de uma galáxia dado que esta banda do espectro eletromagnético é altamente suscetível de obscurecimento. Por outro lado, a poeira ao absorver a radiação incidente, vai emitir radiação térmica do tipo corpo negro com emissão máxima na região do infravermelho longínquo ($50 - 300 \mu m$). Dado que as estrelas O e B emitem a maioria da radiação no ultravioleta, que como vimos é bastante absorvida pela poeira, então será de esperar que a luminosidade no infravermelho longínquo ($\lambda \geq 60 \mu m$) reflita a quantidade de estrelas deste tipo presentes na galáxia. É com base nisto que é possível correlacionar a luminosidade no infravermelho longínquo com a TFE (por exemplo: Kennicutt, 1998). Esta estimativa padece de dois grandes problemas: a contribuição de estrelas velhas para o aquecimento da poeira e a quantidade de poeira presente na galáxia. Nesta primeira, quando medimos a emissão do infravermelho de uma galáxia, temos de ter em conta que parte dessa emissão pode corresponder ao aquecimento por parte de estrelas adultas e velhas (emissão de cirrus) que também aquecem a poeira presente na galáxia. Para além disto, a emissão vai depender da quantidade de poeira que existe na galáxia, podendo ocorrer situações em que haja pouca poeira e, portanto, a radiação ultravioleta proveniente das estrelas jovens poderá não ser totalmente absorvida (Kennicutt, 1998).

Quando consideramos uma galáxia normal, ou seja, uma galáxia que não possui um

núcleo galáctico ativo, a maioria da sua emissão em radiofrequências, no contínuo, tem origem nos remanescentes de supernovas (radiação de sincrotrão) ou nas regiões HII (radiação de bremsstrahlung). Tanto as regiões HII como as supernovas estão relacionadas com estrelas jovens de grande massa ($M > 8 M_{\odot}$) e por esse motivo, estão diretamente relacionadas com a formação estelar. Relativamente à emissão rádio no contínuo, para frequências abaixo de 30 GHz, a componente da emissão de bremsstrahlung é inferior à componente de emissão de sincrotrão (Condon, 1992) - ver imagem 2.10. Esta última provém de eletrões relativistas acelerados nos fortes campos magnéticos dos remanescentes de supernovas. Desta forma, a luminosidade em radiofrequências abaixo de 30 GHz (mais especificamente a 1.4 GHz) deverá ser aproximadamente proporcional ao número de supernovas que por sua vez é proporcional ao número de estrelas jovens de grande massa que são formadas. Assim sendo, é possível utilizar a luminosidade no rádio e, em específico, a emissão no contínuo a 1.4 GHz para estimar TFE em galáxias (por exemplo: Schmitt et al., 2006 e Murphy et al., 2011).

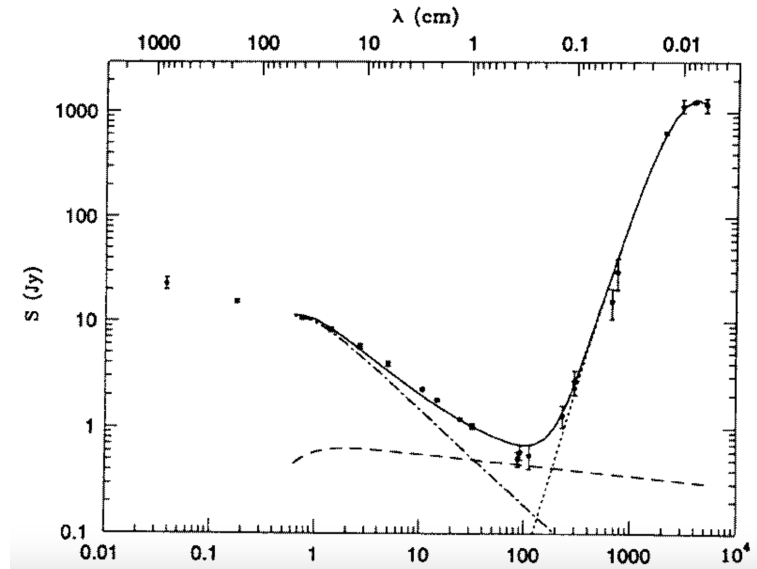


Figura 2.10: Espectro, do rádio ao infravermelho longínquo, de uma galáxia normal, ou seja, sem a presença de um núcleo galáctico ativo. Podemos ver a contribuição da emissão de sincrotrão (linha tracejada e pontilhada), da emissão de bremsstrahlung (linha a tracejado) e a emissão de poeira (linha pontilhada). A linha contínua é a soma de todas estas contribuições. Créditos: Condon (1992).

Uma das grandes vantagens em usar o rádio como indicador de taxas de formação estelar em galáxias é o facto de a estes comprimentos de onda a poeira ser transparente, ou seja, o rádio é insensível aos efeitos de extinção da poeira. Para além disto, dado que a contribuição dos diversos componentes de uma galáxia (para além de supernovas

e regiões HII) para o contínuo espectral, no rádio, de uma galáxia é muito baixa, a emissão no rádio será essencialmente proveniente de fenômenos relacionados com a formação estelar. Por último, é de assinalar que embora ainda não se consiga explicar totalmente a relação entre a TFE e o rádio, existe uma correlação forte entre o fluxo de rádio e o fluxo de infravermelho longínquo (por exemplo: Yun et al., 2001 e Bell, 2003). Como existe uma correlação entre a emissão no infravermelho e a TFE, logo será de esperar que o rádio também esteja correlacionado com a TFE, fornecendo assim mais um suporte para o rádio como indicador de TFE (Calzetti, 2013).

Devido às vantagens apresentadas, no trabalho conduzido nesta dissertação, as taxas de formação estelar em galáxias sem bojo são estimadas usando o rádio como indicador. Até aqui temos estado a assumir galáxias normais, sem a presença de um núcleo galáctico ativo. Contudo, na estimativa da taxa de formação estelar de uma galáxia, é necessário ter em conta que caso esta possua um núcleo galáctico ativo, a maioria da sua emissão no rádio provém da atividade deste núcleo galáctico ativo. Isto dá origem a uma sobrestimação da verdadeira TFE para a galáxia em estudo. Portanto, para o cálculo destas estimativas é importante garantir que a taxa de formação estelar não é afetada pela presença de um núcleo galáctico ativo e torna-se necessário excluir as galáxias que os contêm da amostra. Na próxima secção, vamos ver brevemente o que é um núcleo galáctico ativo e como é que uma galáxia que os alberga se distingue de uma galáxia normal.

2.5 Núcleos Galácticos Ativos

Em algumas galáxias, é possível verificar que existe uma pequena região central (comparada com a dimensão da galáxia) com uma emissão extremamente forte e cuja luminosidade pode mesmo ultrapassar a luminosidade total da sua galáxia anfitriã. A estas regiões atribui-se o nome de Núcleos Galácticos Ativos, daqui em diante AGN (do inglês *Active Galactic Nuclei*), e as suas galáxias anfitriãs designam-se por galáxias ativas.

Existem quatro classes principais de galáxias ativas que são classificadas de acordo com algumas das suas características observacionais - galáxias Seyfert, quasares, rádio-galáxias e blazares. No que se segue, descreveremos sucintamente algumas das propriedades observacionais de cada uma destas classes.

Galáxias Seyfert As galáxias Seyfert são caracterizadas pelas fortes riscas de emissão no seu espectro e pela variabilidade do brilho dos seus núcleos. Para além disto, estas galáxias apresentam um excesso de emissão, comparativamente com as galáxias normais, na banda do infravermelho longínquo e em outros comprimentos de onda. As Seyfert são divididas em dois tipos, 1 e 2, de acordo com a largura das riscas de emissão. As Seyfert 1 possuem no seu espectro riscas de emissão largas,

com larguras a meia altura correspondentes a velocidades do gás na ordem dos $1000 - 5000 \text{ km s}^{-1}$ (Mo et al., 2010). Acredita-se que esta emissão tenha origem numa região do AGN, perto do buraco negro, que é denominada por *Broad Line Region*. As Seyfert 1 também possuem riscas de emissão mais estreitas, mas que mesmo assim correspondem a velocidades na ordem das centenas de quilómetros por segundo, e que se acredita terem origem numa zona mais afastada do buraco negro chamada de *Narrow Line Region*. As Seyfert 2, ao contrário das Seyfert 1 possuem apenas riscas de emissão estreitas no seu espectro.

Quasares Os quasares são os AGN mais luminosos e possuem espectros muito semelhantes às Seyfert 1 com riscas de emissão largas e intensas, embora as riscas de absorção características das contribuições estelares da galáxia hospedeira sejam menos acentuadas. Devido à sua grande luminosidade, que pode ultrapassar a da sua própria galáxia, as suas galáxias anfitriãs são muitas vezes difíceis de distinguir.

Radio-galáxias Estas galáxias ativas apresentam uma forte emissão no rádio e a sua maioria aparenta ser galáxias elípticas. Os seus espectros, à semelhança das Seyfert, podem apresentar riscas de emissão largas e estreitas. Algumas rádio-galáxias apresentam jatos com origem nos seus núcleos e que se podem estender por grandes distâncias (vários kpc ou mesmo Mpc - Mo et al., 2010), terminando em regiões que são grandes emissoras de rádio - estas estruturas são designadas por lobos e geralmente ocorrem aos pares (figura 2.11).

Blazares Os blazares são caracterizados por uma forte emissão no rádio e por uma forte variabilidade na emissão. Esta classe de galáxias ativas encontra-se dividida em dois tipos: objetos BL LAC e os OVVs (do inglês, *Optically Violently Variable*). Os espectros dos BL LAC quase que não apresentam riscas de emissão, e quando estas estão presentes são muito fracas. Ao contrário dos BL LAC, os OVVs apresentam riscas de emissão mais fortes e mais largas.

2.5.1 Estrutura de um AGN

De acordo com os modelos aceites (Urry & Padovani, 1995), um núcleo galáctico ativo é formado por um buraco negro de grande massa ($10^6 - 10^9 M_{\odot}$ - Mo et al., 2010) rodeado por um disco de acreção. Em torno do buraco negro existem duas regiões de nuvens de gás em diferentes estados de ionização, designadas por *broad line region* e *narrow line region*, com dimensões de $\lesssim 1 \text{ ano-luz}$ e $\sim 10 - 100 \text{ pc}$, respetivamente. A temperatura em ambas as regiões é da ordem dos $\sim 10^4 \text{ K}$ embora as densidades sejam diferentes. Para a *broad line region* verificam-se densidades de 10^{10} cm^{-3} e para a *narrow line region* densidades de $10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ (Mo et al., 2010). A região central de um AGN

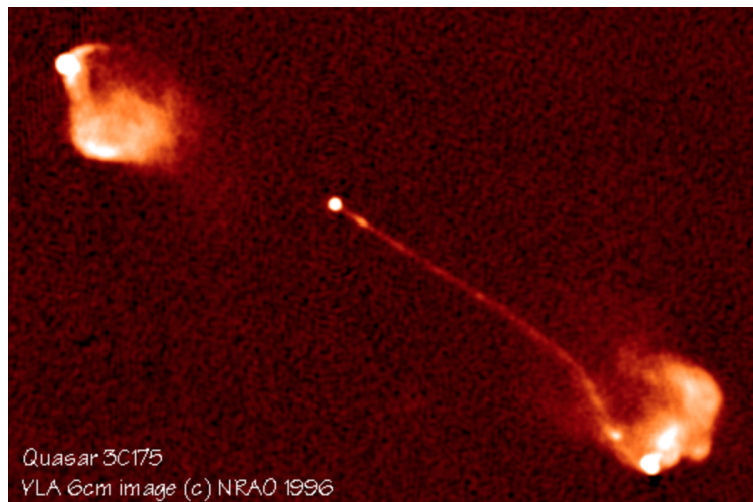


Figura 2.11: Imagem de rádio, obtida pelo VLA, de uma galáxia ativa. É possível ver na imagem dois lobos, um dos jatos e a emissão do núcleo. Créditos: NRAO/AUI.

encontra-se rodeada também por uma estrutura de poeira e gás e que é apelidada de tórus, devido ao facto de se acreditar que tenha uma forma toroidal. (Stalevski et al., 2016). Finalmente, perpendicularmente ao plano do disco de acreção, existem jatos de rádio que podem-se estender por vários megaparsecs. Na figura 2.12 pode-se observar um esquema das estruturas que formam um AGN.

De acordo com o modelo de unificação, as diferentes classes de galáxias ativas podem ser explicadas, em grande parte, de acordo com o ângulo em que se observa o núcleo galáctico ativo (figura 2.13). Quantidades como a massa do buraco negro central, a taxa de acreção e o seu spin, e as diferenças estruturais da morfologia da galáxia, podem, ainda assim, ser relevantes, mas seria a inclinação a determinante para efeitos de classificação. Por exemplo, tendo em conta a estrutura de um AGN, quando olhamos para uma galáxia cujo buraco negro central possui um disco de acreção que se encontra de perfil (relativamente a nós), o tórus de poeira esconde o disco de acreção, e a *broad line region*. Desta forma, apenas vemos riscas de emissão da *narrow line region* e emissão infravermelho reprocessada pela poeira do tórus. Este é o caso em que identificamos a galáxia ativa como sendo, por exemplo, uma Seyfert 2, rádio-galáxia ou quasar. Se, por exemplo, a inclinação da galáxia for tal que conseguimos ver diretamente o núcleo, recebemos diretamente a radiação proveniente dos jatos, que dominará as riscas do espectro. Nestas condições vemos por exemplo BL Lacs ou OVVs. Numa situação intermédia, em que conseguimos visualizar a região central mas em que esta não se encontra diretamente virada para nós, é possível observar tanto a *broad line region* como a *narrow line region*. Este é o caso das galáxias Seyfert 1, algumas rádio-galáxias e quasares.

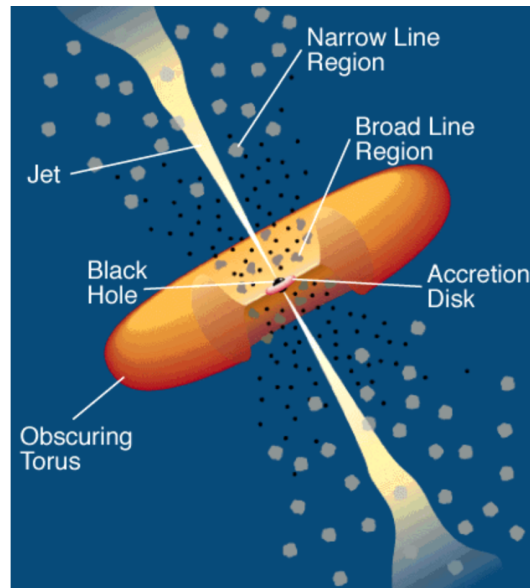


Figura 2.12: Modelo da estrutura de um núcleo galáctico ativo. Créditos: Urry & Padovani (1995).

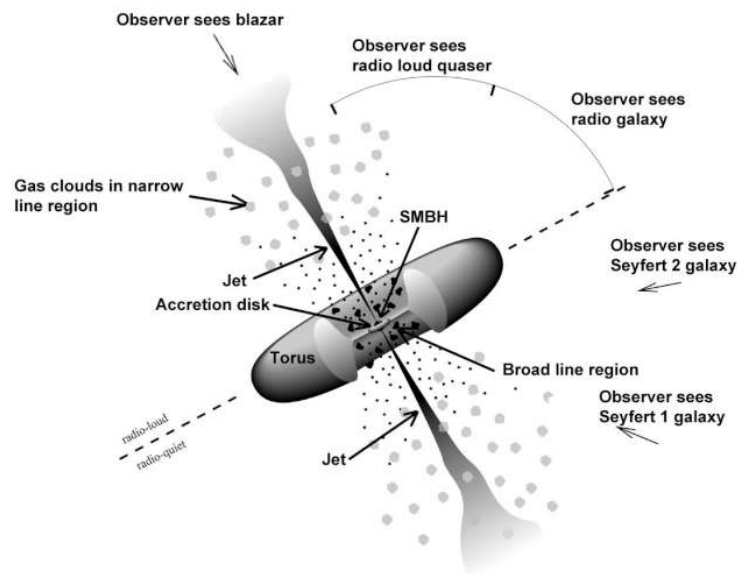


Figura 2.13: Modelo de unificação para as galáxias ativas. Créditos: Fermi, *Gamma-ray Space Telescope*.

2.5.2 Emissão de um AGN

A distribuição espectral de energia (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*) de uma galáxia ativa, mostra que em geral estas galáxias emitem fluxo significativo ao longo de todo o espectro eletromagnético, do rádio aos raios-gama (Peterson, 1997; Mo et al., 2010) - figura 2.14. Para a maioria destes intervalos de energia, os AGN revelam ser as fontes mais brilhantes no céu (Risaliti & Elvis, 2004). Por exemplo, a maioria das fontes muito luminosas, quer nos raios-X quer no rádio, possuem uma emissão nestes comprimentos de onda que é dominada pelos seus núcleos galácticos ativos (por exemplo: Bauer et al., 2002; Mushotzky, 2004; Padovani et al., 2014).

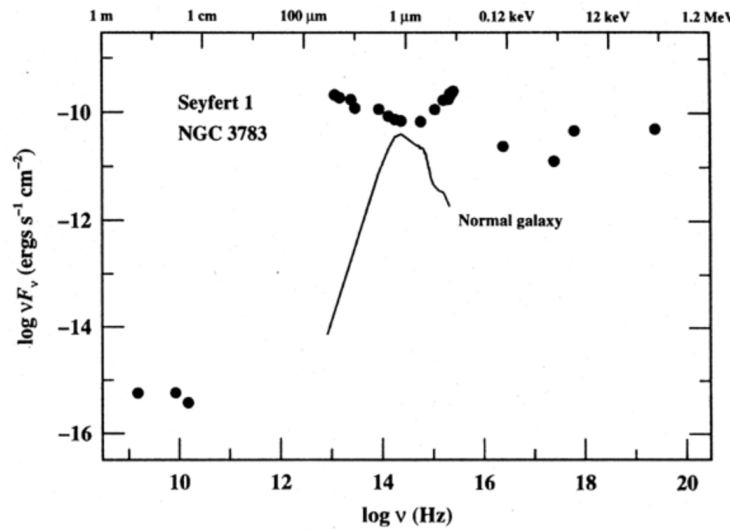


Figura 2.14: Distribuição espectral de energia para uma galáxia ativa (Seyfert 1) e normal. Créditos: Peterson (1997).

De acordo com alguns modelos, a origem por trás da forte emissão de um AGN, é a acreção de matéria por um buraco negro de grande massa no centro da galáxia (Mo et al., 2010). A matéria em acreção, vai espiralar em direção ao buraco negro e é aquecida até temperaturas que podem atingir os $\sim 10^5 - 10^6 K$ emitindo radiação térmica na região do espectro eletromagnético dos ultravioleta e ótico (Gandhi, 2005; Fanali et al., 2013).

A origem da emissão, de um núcleo galáctico ativo, na banda dos raios-X, também é atribuída em parte ao disco de acreção embora existam outros processos associados (Fanali et al., 2013). Os fótons ultravioleta e óticos gerados pelo disco de acreção vão ganhar energia, até à gama dos raios-X, através da interação com elétrons relativistas localizados na região logo acima do disco de acreção, num processo conhecido como dispersão de Compton inversa. Estes mesmos elétrons relativistas são acelerados no campo magnético criado pela atividade nas vizinhanças do buraco negro central, emitindo radiação de sincrotrão. Este é o processo que se acredita estar na origem da

grande emissão rádio que podemos observar em algumas galáxias ativas. Para além disto, estes fótons com energias na banda do rádio, podem também ganhar energia, até à gama dos raios-X, novamente através de dispersão de Compton inversa pelos próprios eletrões relativistas que dão origem à radiação de sincrotrão (Gandhi, 2005; Mo et al., 2010).

A presença do tórus de poeira a rodear alguns dos núcleos galácticos ativos, faz com que a maioria da emissão emitida pelo AGN entre o ótico e os raios-X, seja absorvida ou dispersada. Ao absorver esta radiação incidente, a poeira vai emitir radiação térmica do tipo corpo negro com emissão máxima na região do infravermelho próximo e longínquo (Nenkova et al., 2008). A distribuição espectral de energia de uma galáxia ativa mostra assim uma maior luminosidade nesta banda do espectro eletromagnético, comparativamente com uma galáxia normal, mesmo quando esta se encontra numa fase de elevada taxa de formação estelar (Messias et al., 2012).

Tendo em conta o excesso de luminosidade de uma galáxia ativa, comparativamente com as galáxias normais, este fenómeno pode ser usado à partida para diferenciar estes dois tipos de galáxias (em especial nas bandas do rádio, infravermelho e raios-X). Será neste princípio que no próximo capítulo nos iremos basear para identificar AGNs numa amostra de galáxias.

Capítulo 3

Seleção da Amostra

O trabalho apresentado nesta dissertação centra-se no estudo da taxa de formação estelar, estimada a partir das radiofrequências, de galáxias sem bojo a *redshifts* intermédios, $0.4 \leq z \leq 1$. A realização deste estudo requer a seleção de uma amostra de galáxias com alguns constrangimentos. Para além de estatisticamente robusta, ou seja, com um número elevado de fontes representativas da classe de objetos em foco, a sensibilidade da amostra terá de ser suficientemente elevada para englobar fontes que estejam compreendidas na gama pretendida de *redshifts*. Como o trabalho está direcionado para galáxias sem bojo, a classificação morfológica das fontes na amostra é um fator crucial. Desta forma, esta terá também de possuir os parâmetros necessários à classificação morfológica de galáxias, especificamente relativos à presença de componentes esferoides.

Como foi discutido anteriormente (capítulo 2), a classificação morfológica de galáxias é efetuada na banda do visível. O estudo pretendido da taxa de formação estelar visa a utilização de radiofrequências para o efeito, permitindo por exemplo ultrapassar a limitação provocada pela existência de poeira. Adicionalmente, como será constatado mais à frente, a determinação de taxas de formação estelar requer a identificação e remoção prévia de fontes que possuam núcleos galácticos ativos. Para este efeito, para além da banda do rádio serão usadas também bandas do infravermelho e raios-X. Assim, para além de todos os constrangimentos anteriores, a amostra deverá também possuir fotometria em diferentes comprimentos de onda.

Este capítulo descreve a metodologia utilizada, que deu origem à seleção de uma amostra de galáxias sem bojo com as características necessárias ao estudo da sua taxa de formação estelar em radiofrequências.

3.1 Uma amostra de galáxias sem bojo

Nas últimas duas décadas, têm sido conduzidos diversos levantamentos astronómicos em áreas específicas do céu. Estes dão origem à coleção de conjuntos extensos de dados,

relativos a um número elevado de fontes. As áreas do céu estudadas por estes levantamentos, realizados por observatórios terrestres e/ou espaciais, possuem dimensões variadas e profundidades alcançadas diferentes. Neste contexto, o termo profundidade refere-se à sensibilidade do levantamento, ou seja, à capacidade dos instrumentos que o realizam de detetarem fontes com fluxos baixos (por exemplo, devido a possuírem *redshifts* elevados).

Como foi referido anteriormente, o levantamento que servirá de base para o estudo em decurso nesta dissertação, para além de possuir um número elevado de fontes a *redshifts* intermédios de $0.4 \leq z \leq 1$, necessita de fotometria para essas mesmas fontes em diversas bandas do espectro eletromagnético (raios-X, ótico, infravermelho e rádio). Entre alguns levantamentos disponíveis, como é o caso do *All-wavelength Extended Groth strip International Survey* (AEGIS - Davis et al., 2007), *Galaxy Evolution From Morphology And SEDs* (GEMS - Caldwell et al., 2008) e o *The Great Observatories Origins Surveys* (GOODS - Dickinson et al., 2003; Giavalisco et al., 2004), um em particular mostrou ser indicado para o estudo aqui conduzido, obedecendo aos constrangimentos mencionados - o *Cosmological Evolution Survey* (COSMOS - Scoville et al., 2007).

O COSMOS é o maior levantamento levado a cabo pelo *Hubble Space Telescope* (HST), fazendo uso da *Advanced Camera for Surveys* (ACS), e que cobre uma área no céu de aproximadamente $2^{\circ 2}$ num campo equatorial centrado em: $RA(J2000) = 10^h 00^m 28.6s$ e $DEC(J2000) = +02^{\circ} 12' 21.0''$ (ver figura 3.1). Com aproximadamente 2 milhões de galáxias detetadas, o objetivo deste levantamento consiste no estudo da evolução de estruturas a larga escala, galáxias, formação estelar e núcleos galácticos ativos. O campo do COSMOS não foi apenas sujeito a observações por parte do HST, sendo que outros observatórios (espaciais e terrestres) têm realizado observações que abrangem toda a sua área (ou parte dela) em diversos comprimentos de onda. São alguns exemplos disto o *Very Large Array* (no rádio, VLA-COSMOS), *Chandra X-ray Observatory* (nos raios-X, C-COSMOS) ou o *Spitzer Space Telescope* (no infravermelho, S-COSMOS).

As observações no ótico conduzidas pela câmara ACS foram efetuadas com o filtro F814W e possuem uma sensibilidade ($I_{AB} < 27$) e resolução ($\sim 0.05''$) suficientes para permitir a classificação morfológica de galáxias (decomposição disco-bojo) a *redshifts* ≤ 2 (Scoville et al., 2007). Para além do facto de o COSMOS ser um campo que foi sujeito a um rastreio em muitas bandas do espectro eletromagnético, a disponibilidade de dados no ótico de elevada qualidade (resolução espacial) que permitem caracterizar morfológicamente galáxias a *redshifts* intermédios, torna-o especialmente indicado para o estudo que se pretende com este trabalho.

Atualmente estão disponíveis uma série de catálogos públicos que reúnem dados de levantamentos realizados à área do céu definida pelo COSMOS, em vários comprimentos de onda (VLA-COSMOS, Schinnerer et al., 2010; C-COSMOS, Elvis et al., 2009;

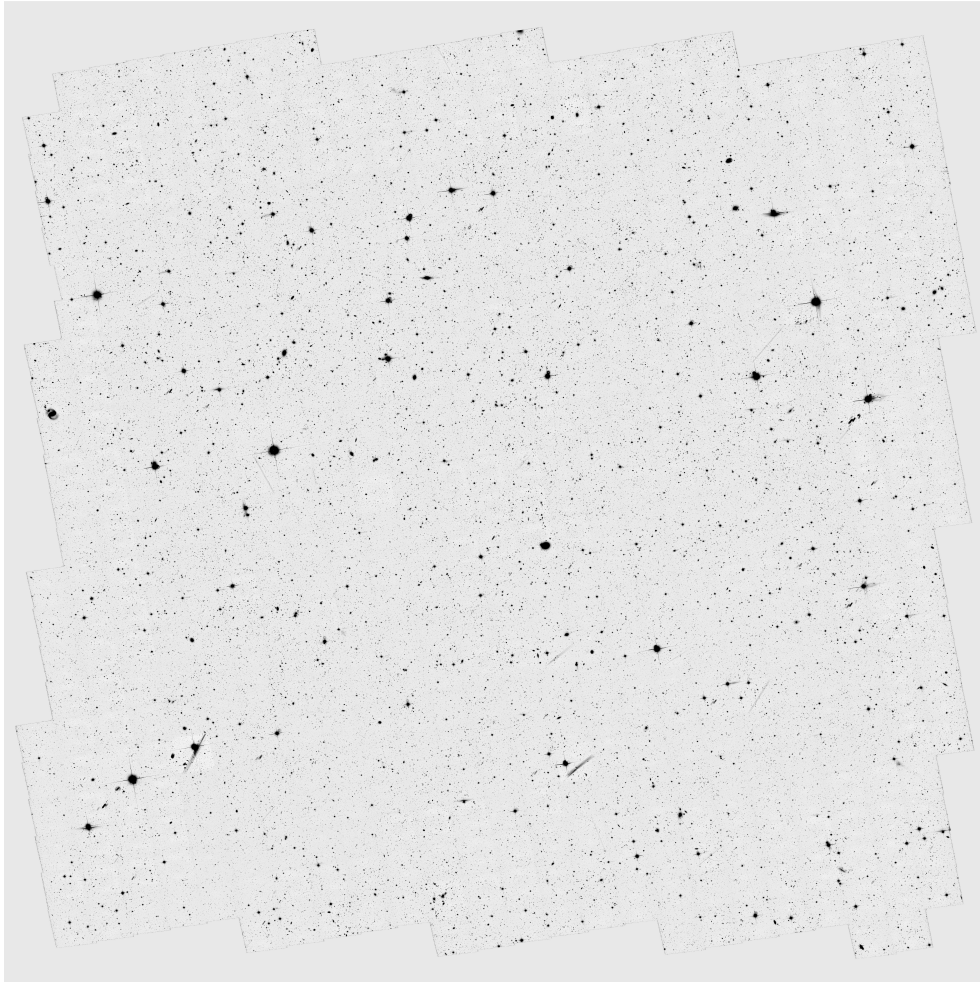


Figura 3.1: Mosaico do campo COSMOS, centrado em $RA(J2000) = 10^h 00^m 28.6s$ e $DEC(J2000) = +02^\circ 12' 21.0''$, obtido com a câmara ACS do HST. A imagem, obtida com o filtro F814W, apresenta cerca de 2 milhões de galáxias até uma magnitude limite $I_{AB} \sim 27$. Créditos: Koekemoer et al. (2007).

S-COSMOS, Sanders et al., 2007). Um catálogo particularmente relevante para o estudo realizado nesta dissertação, foi criado por Griffith et al. (2012), e concatena dados obtidos nos maiores levantamentos levados a cabo pela câmara ACS do HST, não só no COSMOS como também em outros campos como o AEGIS, GEMS e o GOODS. O que torna este catálogo relevante para este estudo, é o facto de conter parâmetros morfológicos para um número elevado de fontes detetadas no COSMOS. Estes parâmetros foram obtidos recorrendo à modelação dos perfis de luminosidade das fontes, resultantes de imagens obtidas com o filtro mais vermelho disponível para cada campo (F814W, no caso do COSMOS). Os perfis de luminosidade de cada fonte foram modelados através de um algoritmo de análise de imagem, o GALFIT (Peng et al., 2012), aplicando a cada perfil apenas uma função de Sérsic. Tal como foi visto no capítulo 2, a aplicação de uma única função de Sérsic ao perfil de luminosidade de uma fonte, permite-nos obter informação relevante quanto à morfologia desta, em particular se é dominada por um disco ou por uma estrutura esferoide como as galáxias elípticas ou os bojos de galáxias espirais.

Recentemente, foi criado um outro catálogo contendo uma amostra de galáxias sem bojo a *redshifts* intermédios - $0.4 \leq z \leq 1$ - (Bizzocchi et al., 2014), baseado no catálogo de Griffith et al. (2012). Este novo catálogo, que será designado daqui em diante por catálogo-L, reúne dados relativos aos campos COSMOS, AEGIS, GEMS e GOODS, assim como os mesmos parâmetros morfológicos presentes no catálogo de Griffith et al. (2012). Contudo, de forma a garantir a robustez da classificação morfológica das fontes no catálogo-L, foram descartadas fontes pontuais, que correspondem a fontes sem estrutura morfológica relevante, reduzindo assim a probabilidade de classificações erróneas. Isto foi feito eliminando todas as fontes com dimensões espaciais inferiores a $0.15''$ - duas vezes a PSF média da câmara ACS. Com o mesmo objetivo, foi realizado um corte em magnitude, descartando as fontes mais ténues, cuja classificação será mais insegura. No caso do campo COSMOS, isto correspondeu a rejeitar todas as fontes com magnitude $I_{AB} \geq 24$. Fontes com inclinações inferiores a 60° ($b/a < 0.5$) foram também rejeitadas de forma a minimizar os efeitos de extinção originados pela poeira nas cores.

As fontes encontram-se divididas em três classes distintas, de acordo com a sua morfologia (caraterizada pelo índice de Sérsic - n). Fontes com índices de Sérsic $n \leq 1.5$ são classificadas como galáxias sem bojo, fontes com $1.5 < n \leq 3$ são classificadas como galáxias intermédias, ou seja, fontes cuja componente esferoide tem uma contribuição crescente (com o índice de Sérsic) para a morfologia da fonte, e fontes com $n > 3$ são classificadas como galáxias dominadas por estruturas esferoides. Na tabela 3.1 podem ser observados os números de fontes presentes no catálogo-L, de acordo com o campo em que foram detetadas e a sua classificação morfológica.

O catálogo-L contém informação sobre o *redshift* das galáxias. Para muitas é apresentado o *redshift* espectroscópico proveniente do espectrógrafo *Visible MultiObject Spectrograph* (VIMOS), instalado no VLT - *zCOSMOS Survey6* (Lilly et al., 2007).

Para um número substancial de fontes este não está disponível, pelo que se usaram *redshifts* fotométricos obtidos recorrendo à enorme cobertura fotométrica do COSMOS (Ilbert et al., 2009). O uso de *redshifts* fotométricos introduz um maior erro devido à maior incerteza na estimativa de *redshifts*, mas a considerável cobertura fotométrica do COSMOS assegura uma boa estimativa.

Para o estudo desenvolvido neste trabalho, foi tido como base o catálogo-L, restringindo-o apenas ao campo COSMOS. Desta forma foi criado um novo catálogo, daqui para a frente designado por *catálogo-B*, que contém uma amostra de 31 714 fontes (tabela 3.2) a *redshifts* intermédios $0.4 \leq z \leq 1$. Destas fontes, 14 139 são, segundo a classificação morfológica apresentada e que se baseia no índice de Sérsic (n), galáxias sem uma componente esferoide significativa, dominadas por um disco, ou seja, galáxias sem bojo ($n \leq 1.5$). Na figura 3.2 pode-se observar a distribuição espacial da amostra de galáxias sem bojo no campo COSMOS.

Tabela 3.1: Número de fontes presentes no catálogo-L de acordo com o campo em que foram detetadas e a sua classificação morfológica (Bizzocchi, et al., 2014).

Campo	Morfologia			
	$n \leq 1.5$	$1.5 < n \leq 3$	$n > 3$	
COSMOS	14139	7259	10316	31714
AEGIS	1588	576	684	2848
GEMS	2267	793	535	3595
GOODS-N	749	74	20	843
GOODS-S	482	199	171	852
Total	19225	8901	11726	39852

Tabela 3.2: Número de fontes presentes no catálogo-B de acordo com a sua classificação morfológica.

Campo	Morfologia		
	$n \leq 1.5$	$1.5 < n \leq 3$	$n > 3$
COSMOS	14 139	7259	10316
Total	31714		

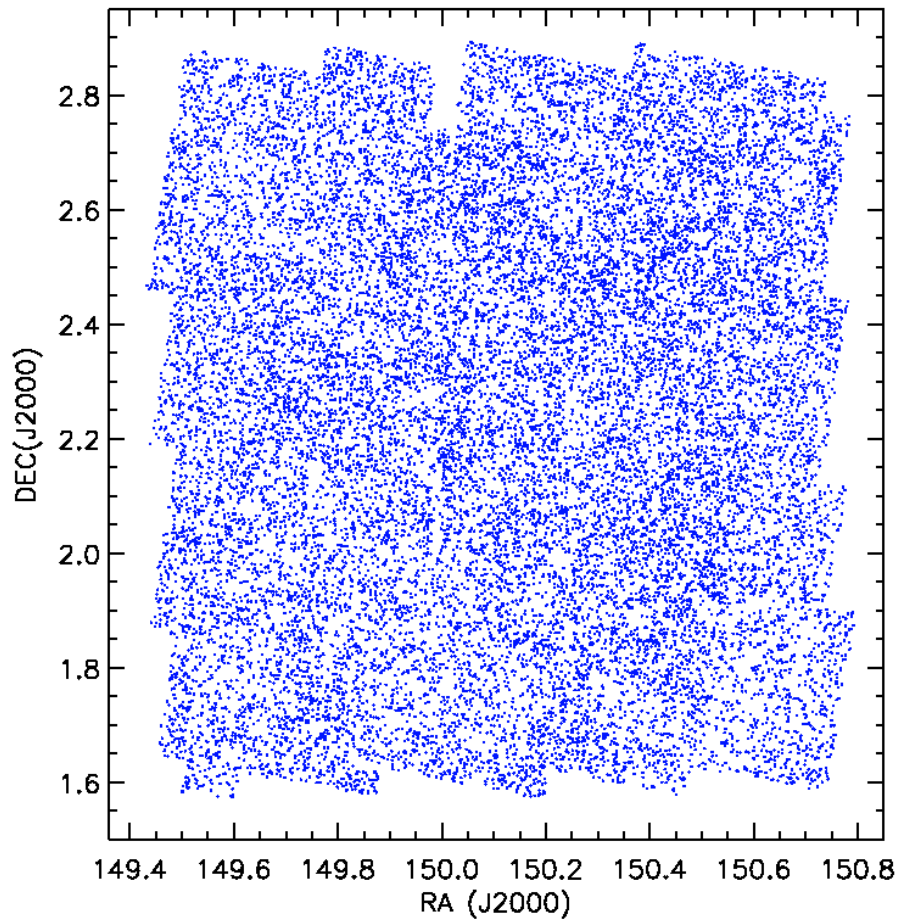


Figura 3.2: Distribuição espacial no campo COSMOS das 14 139 galáxias sem bojo ($n \leq 1.5$) da amostra em estudo. As coordenadas RA e DEC encontram-se expressas em graus.

3.2 Levantamentos em diversos comprimentos de onda

Na secção anterior foram descritos os dados e a metodologia que deram origem à criação de um catálogo ótico que reúne as características necessárias à realização do presente estudo. Contudo, a determinação da taxa de formação estelar de galáxias usando o fluxo no rádio como indicador, requer o uso de fotometria nesta banda. Para além disto, é importante fazer a ressalva de que para uma galáxia ativa, parte ou mesmo a maioria da sua emissão na banda do rádio terá provavelmente origem no seu núcleo galáctico ativo. Por esta razão a estimativa, no rádio, da taxa de formação estelar de uma galáxia deste tipo, conduziria a valores incorretos, ou seja, haveria uma sobrestimação da verdadeira taxa. Desta forma, torna-se necessário proceder à identificação e posterior remoção de fontes da nossa amostra de galáxias sem bojo, que possuam núcleos galácticos ativos, antes da determinação da estimativa das suas taxas de formação estelar. Para este efeito utilizar-se-á informação a partir de observações no infravermelho, raios-X e rádio, na região do COSMOS.

De seguida, encontra-se uma breve descrição de cada um dos levantamentos do campo COSMOS, e respetivos catálogos, realizados no rádio (VLA-COSMOS), raios-X (C-COSMOS) e infravermelho (S-COSMOS e UltraVista COSMOS). Quando necessário, alguns dados destes catálogos foram sujeitos a rejeição de forma a garantir a robustez fotométrica dos mesmos.

3.2.1 Rádio: VLA-COSMOS

O *VLA-COSMOS* é um levantamento em rádio-frequências ($1.4\text{ GHz} - 20\text{ cm}$) de toda a área do campo COSMOS ($\sim 2^\circ 2'$) realizado pelo *Very Large Array* (VLA) do *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO). O catálogo utilizado neste estudo foi o *Joint Catalog*, que reúne os últimos dados do *VLA-COSMOS Deep project* e a segunda versão do *VLA-COSMOS Large project* (Schinnerer et al., 2010). As 2864 fontes presentes neste catálogo, foram detetadas até 5σ , com uma sensibilidade média de $12\mu\text{Jy}$.



Figura 3.3: O *Very Large Array* (VLA) do *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO). Créditos: NRAO/AUI e NRAO

3.2.2 Infravermelho: S-COSMOS e UltraVISTA

No caso da banda do infravermelho foram utilizados dados provenientes de dois levantamentos, o *COSMOS Spitzer Survey* (S-COSMOS) e o *UltraVISTA COSMOS Survey*. Tal como será discutido mais à frente (secção 3.3), o critério utilizado neste trabalho para a identificação no infravermelho de galáxias com núcleos galácticos ativos, foi o de Messias et al. (2012). Neste critério, é necessário possuir-se informação fotométrica relativa às bandas $4.5\ \mu\text{m}$, $8.0\ \mu\text{m}$ (disponível no levantamento realizado pelo *Spitzer Space Telescope*) e K_s (disponível no levantamento realizado pelo telescópio *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy* (VISTA), o *Ultra Deep Survey with the VISTA telescope* - *UltraVISTA*).

- ***COSMOS Spitzer Survey*:** O *S-COSMOS*, é um levantamento realizado pelo Telescópio Espacial Spitzer a toda a área do COSMOS ($2^\circ 2'$). Este levantamento foi realizado em todas as sete bandas do Spitzer (3.6, 4.5, 5.6, 8.0, 24.0, 70.0 e $160.0\ \mu\text{m}$) com sensibilidades medidas (5σ) que variam entre os $0.0009 - 0.0146\ \text{mJy}$ para as bandas $3.6 - 8.0\ \mu\text{m}$ (IRAC) e entre os $0.42 - 150\ \text{mJy}$ para as bandas $24 - 160\ \mu\text{m}$ (MIPS) (Sanders et al., 2007). O catálogo utilizado neste trabalho possui um total de 345 512 fontes com informações relativas às quatro bandas do IRAC.

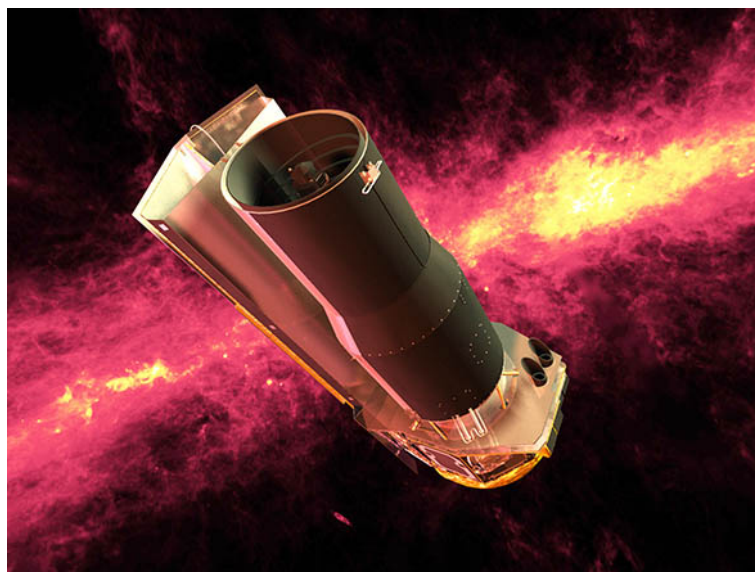


Figura 3.4: O Telescópio Espacial Spitzer. Créditos: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)

- ***UltraVISTA COSMOS Survey*:** O *UltraVISTA COSMOS Survey* é um levantamento realizado pelo *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy* (VISTA) à região do COSMOS nas bandas Y,J,H e K_s com sensibilidades medidas (5σ)

numa abertura de $2''$ de 25 (magnitudes AB) para a banda Y e 23.7 para as bandas J,H e K_s (McCracken et al., 2012). Como será visto mais à frente, o catálogo utilizado neste estudo possui apenas fotometria relativa à banda K_s para 331 077 fontes.



Figura 3.5: O *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy (VISTA)*. Créditos: ESO

De forma a assegurar que os dados usados possuem uma fotometria robusta, foram realizados cortes em ambos os catálogos do infravermelho. Observemos o histograma apresentado na figura 3.6, onde é possível ver a distribuição do número de fontes, detetadas pelo *UltraVISTA COSMOS Survey*, em função da magnitude medida na abertura de $2''$. Como se pode verificar, a partir de um certo limite em magnitude (~ 23.7), o número de fontes detetadas diminui. Este fenómeno tem origem num efeito de seleção (efeito de malmquist) originado pela limitação tecnológica da sensibilidade dos instrumentos de deteção atuais. Isto significa que, por exemplo, para fontes a um determinado *redshift* elevado apenas as mais luminosas serão detetadas, ou seja, aquelas que possuem fluxos acima do limite inferior de deteção do instrumento. Dado que a partir desta magnitude as galáxias são cada vez menos detetadas, deixamos de conseguir obter informação robusta para magnitudes acima deste valor - a amostra é incompleta.

Devido ao fenómeno explicitado acima, para o *UltraVISTA COSMOS Survey*, efetuou-se um corte em magnitude de acordo com o referenciado em McCracken et al. (2012) e que se encontra indicado na figura 3.6. Foram retiradas do catálogo todas as fontes com magnitude (AB), medida na abertura de $2''$ na banda K_s , superior a 23.7. Da mesma forma, procedeu-se a cortes no catálogo do *S-COSMOS*. Dado que para o caso específico deste catálogo o estudo em decurso necessita apenas de fotometria relativa a duas

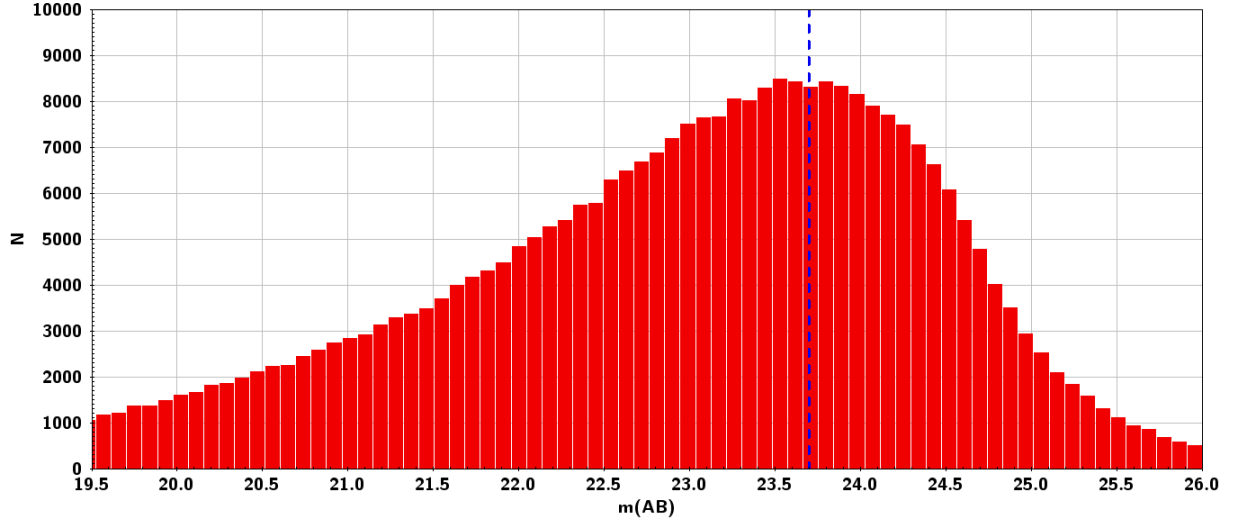


Figura 3.6: Distribuição do número de fontes, no catálogo do UltraVISTA, em função da magnitude na banda K_s , medida na abertura de $2''$. A linha azul tracejada corresponde a $m = 23.7$. Foram rejeitadas todas as fontes com magnitude $m > 23.7$.

bandas, os cortes foram efetuados apenas nessas mesmas bandas. Foram retiradas todas as fontes com fluxos totais inferiores a 1.7 e $14.6 \mu J$, respetivamente para as bandas 4.5 e $8.0 \mu J$ (Sanders et al., 2007).

O *S-COSMOS* fornece os fluxos medidos em aberturas distintas, que podem ser transformadas em fluxos totais usando relações de conversão apropriadas¹. Antes de se efetuarem os cortes descritos, foram obtidos os fluxos totais (f_{total}), a $4.5 \mu m$ e $8.0 \mu m$, dos fluxos medidos numa abertura de $1.9''$ ($f_{1.9''}$) usando as seguintes relações:

$$f_{total}(4.5 \mu m) = \frac{f_{1.9''}(4.5 \mu m)}{0.740} \quad \text{e} \quad f_{total}(8.0 \mu m) = \frac{f_{1.9''}(8.0 \mu m)}{0.580}$$

Após os cortes indicados, ficou-se com um número total de 204 719 fontes (331 077 iniciais) para o *UltraVISTA COSMOS Survey* e de 52 020 (345 512 iniciais) para o *S-COSMOS*.

3.2.3 Raios-X: C-COSMOS

O *COSMOS Chandra Survey* (C-COSMOS) é um levantamento nos raios-X ($0.5 - 10 \text{ keV}$) realizado pelo *Chandra X-ray Observatory* que cobre uma área de aproximadamente 0.9° ² do campo COSMOS. O catálogo deste levantamento possui um total

¹As relações de conversão foram obtidas no *S-COSMOS IRAC Photometry Catalog Definitions* em http://irsa.ipac.caltech.edu/data/COSMOS/tables/scosmos/scosmos_irac_200706_colDescriptions.html.

de 1761 fontes detetadas até um limite de sensibilidade $1.9 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $7.3 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $5.7 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respetivamente nas bandas $0.5 - 2 \text{ keV}$, $2 - 10 \text{ keV}$ e $0.5 - 10 \text{ keV}$ (Elvis et al., 2009).



Figura 3.7: *Chandra X-ray Observatory*. Créditos: NASA

O catálogo do C-COSMOS apresenta algumas fontes sem deteção numa ou mais bandas observadas. Como será discutido mais à frente (secção 3.3), o critério utilizado para a identificação nos raios-X de galáxias com núcleos galácticos ativos, foi o de Szokoly et al. (2004). Como neste critério, é necessário possuir-se informação fotométrica relativa à banda $0.5 - 10 \text{ keV}$, é importante garantir que todas as fontes possuem deteção na mesma. Desta forma, foram retiradas do catálogo todas as fontes sem fluxo detetado na banda $0.5 - 10 \text{ keV}$. Após o corte, ficou-se com 1726 fontes (1761 iniciais).

Na tabela 3.3 pode-se observar o número de fontes de cada levantamento usado neste estudo, antes e após os cortes efetuados. Na figura 3.8 é possível visualizar a cobertura destes vários levantamentos na região do COSMOS.

Tabela 3.3: Número de fontes presentes nos catálogos dos levantamentos do COSMOS antes e após os cortes efetuados.

Levantamento	Número de Fontes	Número de Fontes Após Cortes
VLA-COSMOS	2864	2864
S-COSMOS	345 512	52 020
UltraVISTA	331 077	204 719
C-COSMOS	1761	1726

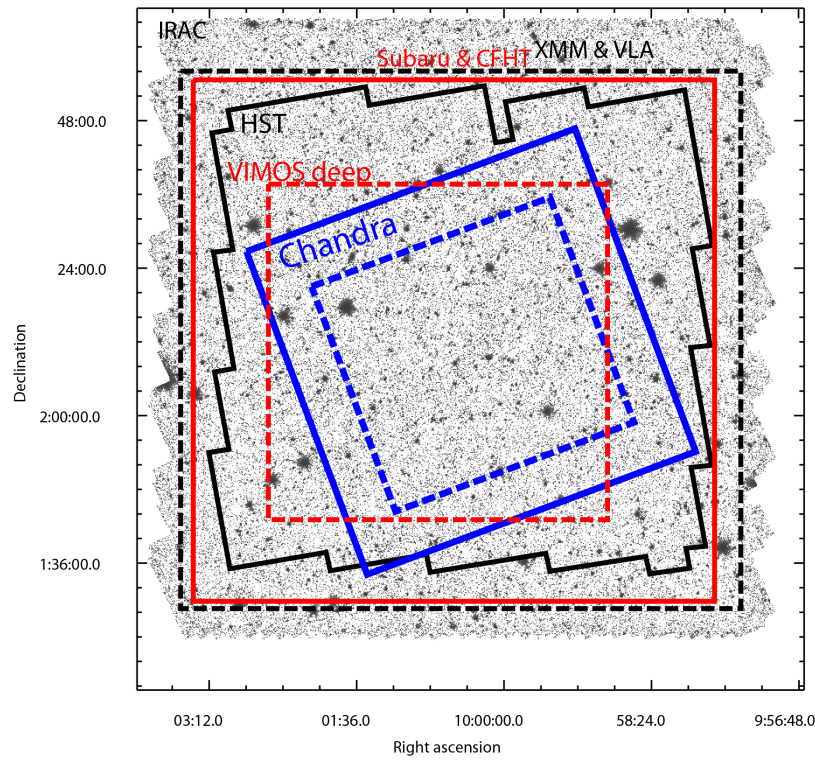


Figura 3.8: Área coberta por diversos levantamentos na região do COSMOS. A imagem de fundo representa a área observada pelo IRAC a $3.6 \mu m$. A linha preta contínua delimita a área observada pelo HST e a linha preta tracejada pelo VLA e XMM. A azul encontra-se a área observada pelo *Chandra Large Survey* (linha contínua) e *Deep Survey* (tracejada). A vermelho tem-se as áreas cobertas pelo Subaru e CFHT (linha contínua) e pelo levantamento *VIMOS deep* (tracejada). Créditos: Elvis et al. (2009).

3.2.4 Correspondência entre catálogos

As fontes presentes nos catálogos descritos anteriormente, e consequentemente todos os seus dados fotométricos relevantes para este estudo, foram correlacionadas com as fontes presentes no catálogo ótico que deu origem à classificação morfológica de Griffith et al. (2012)².

Esta correlação foi efetuada recorrendo a um algoritmo baseado numa adaptação do método de *likelihood ratio* (Sutherland & Saunders, 1992). Este algoritmo considera cada par formado por uma fonte no catálogo rádio (ou infravermelho ou de raios-X) e uma fonte no catálogo ótico e determina uma probabilidade de as fontes serem uma correspondência não falsa. Tal estimativa tem em conta os erros na posição das fontes nos catálogos de rádio, infravermelho e raios-X, a densidade de fontes no catálogo ótico, que é calculada considerando a área do campo observado, e as suas respectivas magnitudes óticas. Para acelerar o processo definiu-se explicitamente uma distância máxima (raio de rastreio) para a estimativa das probabilidades.

O cálculo das probabilidades foi realizado num raio de rastreio igual a 5 vezes o erro posicional de cada fonte nos raios-X e infravermelho, para as quais se querem obter os correspondentes óticos. No caso do rádio, devido ao facto de as fontes poderem ser extensas (por exemplo, devido à presença de jatos), decidiu-se dar mais amplitude no raio de rastreio. Assim, para procurar possíveis correspondentes óticos no rádio, foi atribuído um raio de rastreio igual a 10 vezes o erro posicional das fontes presentes neste catálogo.

No caso em que o algoritmo forneceu mais do que uma correspondência, assumiu-se a fonte com a maior probabilidade de ser uma correspondência não falsa.

Foram encontrados 2058 correspondentes óticos (do catálogo de Griffith et al. (2012)) no VLA-COSMOS, 31 241 no S-COSMOS, 155 051 no UltraVista COSMOS e 1311 no C-COSMOS. Na figura 3.9, é possível observar a distribuição das probabilidades obtidas para cada uma das correspondências entre as fontes dos catálogos de rádio, infravermelho e raios-X e as fontes presentes no catálogo ótico de Griffith et al. (2012).

Em todas as correlações efetuadas, verifica-se que mais de 90% das fontes possuem uma probabilidade de serem uma correspondência não falsa (p) maior ou igual a 70% (tabela 3.4). Assim, de forma a maximizar a robustez e confiança nos resultados, foi efetuado um corte em probabilidade, considerando que todas as correspondências não falsas são aquelas com $p \geq 0.7$.

²Como foi discutido anteriormente (secção 3.1), o catálogo-B não possui, por exemplo, fontes pontuais que foram removidas por Bizzocchi et al. (2014) do catálogo de Griffith et al. (2012) com o intuito de aumentar a robustez da classificação morfológica da amostra. Dado que o algoritmo utiliza a densidade de fontes a uma certa magnitude no catálogo ótico para o cálculo das probabilidades de correspondência, a ausência destas fontes pontuais poderá conduzir a um valor erróneo desta densidade, levando assim a probabilidades de correspondência incorretas. Assim sendo, o catálogo ótico utilizado para realizar as correspondências foi o catálogo de Griffith et al. (2012), que serviu de ponto de partida para o catálogo-L, que por sua vez deu origem à amostra de galáxias sem bojo em estudo (catálogo-B).

Tabela 3.4: Número de fontes resultantes das correspondências entre os catálogos de rádio, infravermelho e raios-X e o catálogo ótico de Griffith et al. (2012). É possível verificar que mais de 90% das fontes possuem uma probabilidade de serem uma correspondência não falsa (p) maior ou igual a 70%.

Catálogo	Nr. Fontes	$p < 0.7$	$p \geq 0.7$
VLA-COSMOS	2058	168	1890
S-COSMOS	31 241	2736	28 505
UltraVISTA	155 051	3126	151 925
C-COSMOS	1311	107	1204

As fontes resultantes destas correspondências, foram correlacionadas posteriormente com o catálogo-B. Dado que as fontes neste mantêm os mesmos números de identificação presentes no catálogo de Griffith et al (2012), a correlação foi direta. Desta forma, das 31 714 fontes presentes no catálogo-B, 526 ($\sim 1.7\%$) possuem identificação no rádio e 242 ($\sim 0.8\%$) nos raios-X. No infravermelho, 6877 ($\sim 21.7\%$) tem identificação no S-COSMOS e 27 826 ($\sim 87.7\%$) no UltraVISTA COSMOS. Estes números encontram-se resumidos na tabela 3.5, onde se pode ver também a quantidade destas fontes, com identificação em outros comprimentos de onda, que são classificadas como galáxias sem bojo ($p \geq 0.7$, $n \leq 1.5$).

Tabela 3.5: Número de fontes no catálogo-B com identificação no rádio, raios-X ou infravermelho. É possível ainda observar o número de galáxias sem bojo com identificação nestes comprimentos de onda.

Catálogo	Nr. Fontes	$p \geq 0.7$	$p \geq 0.7, n \leq 1.5$
VLA-COSMOS	1890	526	104
S-COSMOS	28 505	6877	2019
UltraVISTA	151 925	27 826	12 290
C-COSMOS	1204	242	14

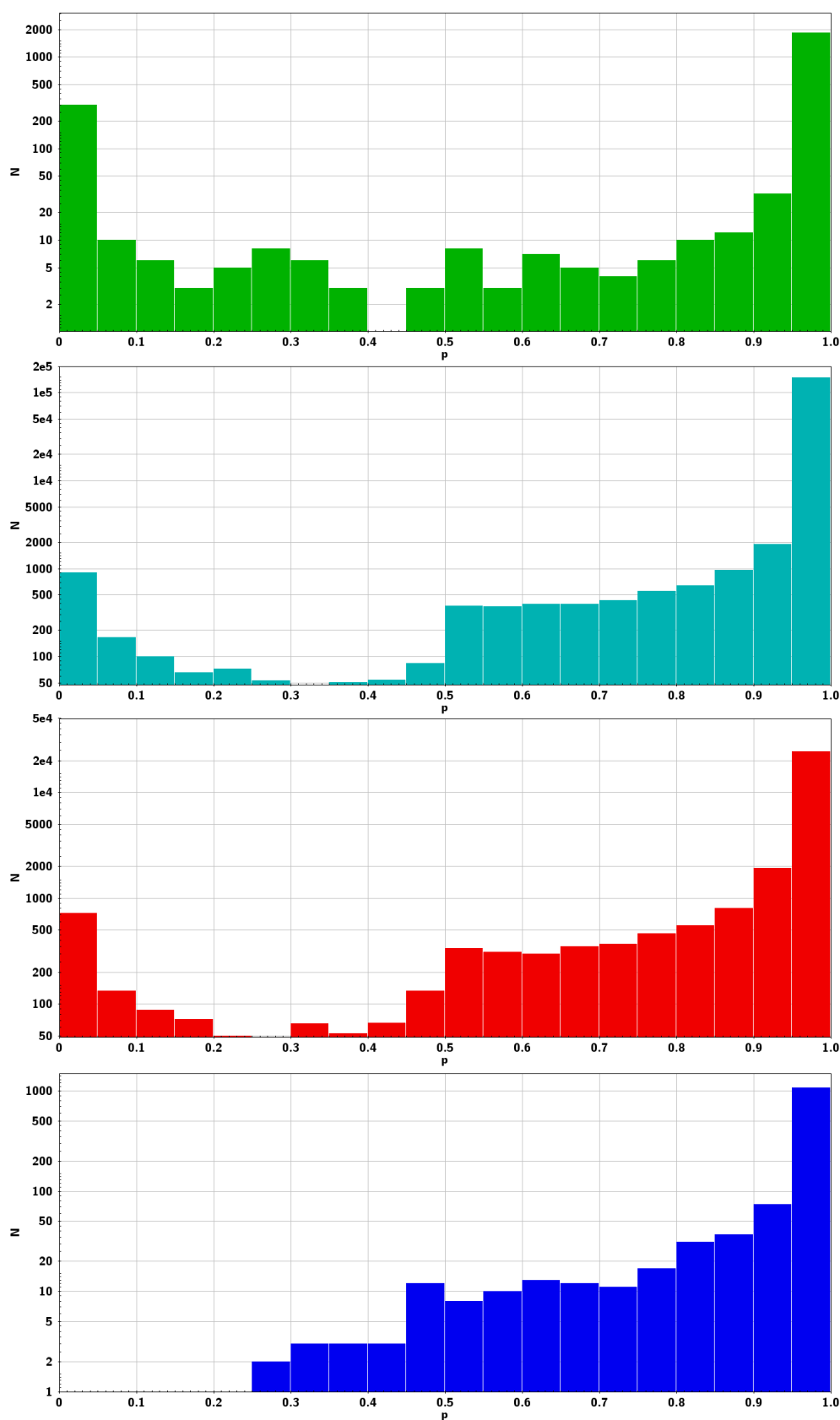


Figura 3.9: Distribuição da probabilidade de correspondência (p) entre os catálogos VLA-COSMOS (verde), UltraVISTA COSMOS (azul claro), S-COSMOS (vermelho), C-COSMOS (azul escuro) e o catálogo ótico. O eixo dos yy, correspondente ao número de fontes (N), encontra-se em escala logarítmica.

3.3 Identificação de Núcleos Galácticos Ativos

Na determinação da taxa de formação estelar de uma galáxia em radiofrequências, é necessário ter em conta que a emissão na banda do rádio poderá ter origem tanto em processos relacionados com a formação estelar, como na atividade do núcleo central da galáxia. Neste sentido, é necessário diferenciar galáxias ativas de galáxias normais, garantindo assim que a taxa de formação estelar calculada refletirá o seu verdadeiro valor para os objetos em questão. Desta forma, no que se segue, procedeu-se à identificação de galáxias ativas na amostra em estudo.

3.3.1 AGNs em radiofrequências

Para galáxias com densidades de fluxo no rádio (1.4 GHz) $S_{1.4\text{ GHz}} \gtrsim 1\text{ mJy}$ a emissão é dominada essencialmente pelos processos que decorrem nos seus núcleos, ou seja, a população é formada maioritariamente por AGNs (Padovani et al., 2014).

Desta forma, poderíamos inferir diretamente que um bom critério para a identificação de AGNs no rádio seria considerar todas as fontes com densidade de fluxo superior a 1 mJy . No entanto, verifica-se que para fontes com densidades de fluxo inferiores a 1 mJy (e pelo menos até $\sim 0.05\text{ mJy}$) a população de galáxias deixa de ser dominada por AGNs, passando a haver um número crescente de galáxias não ativas com formação estelar em decurso, daqui em diante SFG (do inglês *Star Forming Galaxies*). Esta população submilijansky é formada por um número aproximadamente equitativo de galáxias de ambos os tipos, sendo que abaixo de $\sim 0.05\text{ mJy}$ a população é dominada essencialmente por SFG (Padovani et al., 2014).

Tendo isto em conta, seria errado assumir que todas as fontes com densidades de fluxo inferiores a 1 mJy não são AGNs, mas ao mesmo tempo não é possível distinguir os dois tipos de galáxias usando meramente os seus fluxos no rádio. Assim sendo, o critério mais viável para a identificação direta de AGNs no rádio é a própria luminosidade no rádio.

Um estudo realizado por Afonso et al. (2005a) a uma população sub-milijansky de galáxias observadas no *Phoenix Deep Survey*, no qual foi efetuada a distribuição de luminosidade no rádio de diversas SFG e AGNs, levou à descoberta de SFG com luminosidades máximas de $L_{1.4\text{ GHz}} = 10^{24.5}\text{ W Hz}^{-1}$. Assim, este valor estabelece um limite superior para a luminosidade no rádio das SFG. Tendo ainda em conta que este valor de luminosidade corresponde a uma taxa de formação estelar de aproximadamente $2000\text{ M}_{\odot}\text{ ano}^{-1}$ (Bell, 2003 - ver capítulo 4), é pouco provável que para uma luminosidade superior, esta tenha origem em fenómenos de formação estelar nestes objetos (Riechers et al., 2013).

Desta forma, o critério adotado neste trabalho é o de que todas as fontes com $L_{1.4\text{ GHz}} \geq 10^{24.5}\text{ W Hz}^{-1}$ são galáxias ativas, cuja luminosidade no rádio tem origem essencialmente nos seus núcleos galácticos ativos.

Com o objetivo de se aplicar o critério adotado à amostra de galáxias sem bojo em estudo, calculou-se a densidade de luminosidade no rádio para as 104 galáxias sem bojo com identificação no rádio (Tabela 3.5), de acordo com a expressão de Afonso et al. (2005b):

$$L_{1.4GHz} = 4\pi d_L^2 S_{1.4GHz} 10^{-33} (1+z)^{\alpha-1}, WHz^{-1} \quad (3.1)$$

onde d_L é a distância de luminosidade (expressa em cm), $S_{1.4GHz}$ é a densidade de fluxo a $1.4GHz$ (em mJy), z é o *redshift* da fonte e α é o índice espectral no rádio. Foi assumido um índice espectral $\alpha = 0.8$, característico da radiação de sincrotrão que é um dos processos dominantes para a emissão rádio de galáxias, sejam elas SFG ou AGNs.

Como foi referido anteriormente, as fontes presentes no *Joint Catalog* do VLA-COSMOS correspondem a fontes detetadas a 5σ , sendo $1\sigma \simeq 0.012mJy$. Por este motivo, não é de esperar encontrarmos neste catálogo fontes com fluxos abaixo de $5\sigma = 0.06mJy$. Este limite em fluxo é o mesmo para todas as fontes no catálogo, independentemente da distância a que estas se encontram. Porém, se quisermos estimar o limite inferior para a luminosidade das fontes no catálogo, necessitamos de ter em conta o *redshift*. Assumindo valores de *redshift* com $\Delta z = 0.1$ em $0.4 \leq z \leq 1.0$, obtemos os valores apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Valores para os limites inferiores de luminosidade no catálogo *Joint Catalog* do VLA-COSMOS.

z	5σ (mJy)	$L_{1.4GHz}$ (W/Hz)
0.4	0.06	3.13×10^{22}
0.5	0.06	5.27×10^{22}
0.6	0.06	8.11×10^{22}
0.7	0.06	1.17×10^{23}
0.8	0.06	1.61×10^{23}
0.9	0.06	2.14×10^{23}
1.0	0.06	2.75×10^{23}

Na figura 3.10 encontra-se um gráfico da luminosidade a $1.4GHz$ ($L_{1.4GHz}$) das 104 galáxias sem bojo com identificação no rádio, em função do *redshift* (z). Tal como seria de esperar, todas as fontes encontram-se acima da linha que define o limite inferior para a luminosidade das fontes no catálogo. Segundo o critério estabelecido, na amostra de 104 galáxias sem bojo, apenas uma possui um núcleo galáctico ativo dado que tem uma

luminosidade ($L_{1.4GHz} = 5.11 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$) acima de $L_{1.4GHz} = 10^{24.5} \text{ W Hz}^{-1}$. Isto corresponde a $\sim 1\%$ das galáxias sem bojo com identificação no rádio.

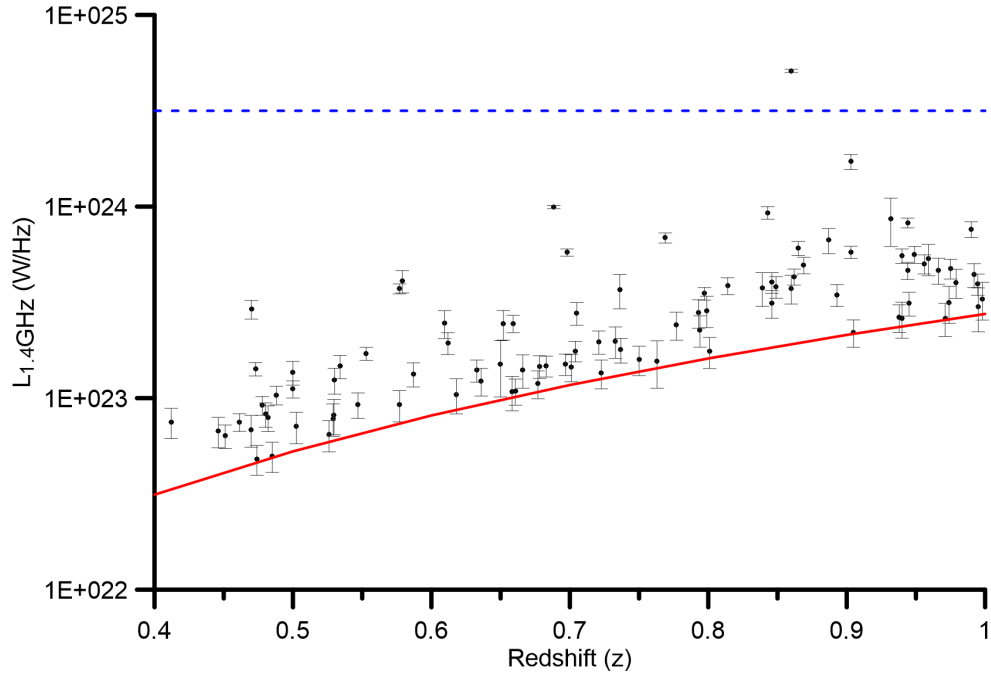


Figura 3.10: Luminosidade a 1.4 GHz ($L_{1.4GHz}$) em função do *redshift* (z), para as 104 galáxias sem bojo com identificação no rádio. A linha contínua a vermelho representa o limite inferior para a luminosidade das fontes no catálogo VLA-COSMOS. A linha tracejada a azul corresponde a uma luminosidade de $L_{1.4GHz} = 10^{24.5} \text{ W Hz}^{-1}$, acima da qual todas as fontes são consideradas AGN. O eixo dos yy, que corresponde à luminosidade a 1.4 GHz ($L_{1.4GHz}$), encontra-se em escala logarítmica.

3.3.2 AGNs em raios-X

A emissão nos raios-X da maioria das fontes extra-galácticas é considerada como sendo dominada essencialmente por núcleos galácticos ativos para fluxos $S_X \geq 10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Akiyama et al., 2000; Lehmann et al., 2001; Bauer et al., 2002; Mushotzky, 2004). Para fluxos abaixo dos $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, verifica-se que a população é formada por um número crescente de SFG (Mushotzky, 2004). Desta forma, para estes fluxos, torna-se difícil de distinguir estes dois tipos de galáxias. De forma semelhante ao caso das radiofrequências, o critério mais viável para a identificação direta de AGNs nos raios-X, é a própria luminosidade.

Em geral, considera-se que todas as fontes de raios-X com luminosidades $L_X \geq 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ possuem um núcleo galáctico ativo (Mushotzky, 2004; Afonso et al, 2005b).

Este valor estabelece um limite superior para a luminosidade das SFG, que raramente atingem estes valores de luminosidade (Mushotzky, 2004), embora isto não signifique que não possam existir galáxias ativas com luminosidades mais baixas.

Para galáxias ativas obscurecidas (por exemplo, devido à poeira na região central da galáxia) a luminosidade pode ser inferior a $10^{42} \text{ erg s}^{-1}$. Por este motivo, o critério adotado neste trabalho para identificação de candidatos a AGN nos raios-X, foi o de Szokoly et al. (2004) e que é apresentado de seguida:

$$\text{AGN-2: } 10^{41} \leq L_X < 10^{44} (\text{erg s}^{-1}) \text{ e } HR > -0.2$$

$$\text{AGN-1: } 10^{42} \leq L_X < 10^{44} (\text{erg s}^{-1}) \text{ e } HR \leq -0.2$$

$$\text{QSO-2: } L_X \geq 10^{44} (\text{erg s}^{-1}) \text{ e } HR > -0.2$$

$$\text{QSO-1: } L_X \geq 10^{44} (\text{erg s}^{-1}) \text{ e } HR \leq -0.2$$

onde L_X é a luminosidade nos raios-X na banda $[0.5 - 10] \text{ keV}$ e HR é o *hardness ratio*. Este último é definido de acordo com a expressão:

$$HR = \frac{(H - S)}{(H + S)} \quad (3.2)$$

onde S e H são, respetivamente, as contagens na banda mole ($[0.5 - 2] \text{ keV}$) e na banda dura ($[2 - 10] \text{ keV}$). O *hardness ratio* é usado como um indicador de quão obscurecido é o AGN, existindo uma correlação ente o HR e N_H , na qual se verifica existir uma separação entre AGNs obscurecidos ($HR > -0.2$) e pouco obscurecidos ($HR < -0.2$) (Mainieri et al., 2002).

Neste critério, são definidos dois tipos de galáxias ativas: tipo 1 (AGN-1, QSO-1) e tipo 2 (AGN-2, QSO-2). As de tipo 1 são constituídas por fontes na banda mole, pouco obscurecidas e com densidades de coluna $N_H < 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. As fontes de tipo 2 são fontes na banda dura, obscurecidas e com densidades de coluna $N_H \geq 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. (Szokoly et al., 2004)

O catálogo do C-COSMOS possui informação relativa ao *hardness ratio* para a maioria das fontes, mas não para todas. Para fontes sem informação acerca do seu *hardness ratio*, foi assumido que todas aquelas com uma luminosidade $L_X \geq 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ possuem um núcleo galáctico ativo.

De forma a se poder aplicar o critério de Szokoly et al. (2004) à amostra de galáxias sem bojo em estudo, calculou-se a luminosidade nos raios-X para as 14 galáxias sem bojo (6 das quais sem informação acerca do seu HR) com identificação nos raios-X (Tabela 3.5), de acordo com a expressão de Afonso et al. (2005b):

$$L_X = 4\pi d_L^2 f_X (1+z)^{\Gamma-2}, \text{erg s}^{-1} \quad (3.3)$$

onde d_L é a distância de luminosidade (expressa em cm), f_X é o fluxo nos raios-X na banda $[0.5 - 10] \text{ keV}$ (em unidades de $\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), z é o *redshift* da fonte e Γ é o índice de fóton. Foi assumido um índice de fóton $\Gamma = 1.4$, igual para todas as fontes, dado que não é esperado que as galáxias sem bojo possuam muitos AGNs, fazendo assim com que sejam fontes fracas nesta banda (Alexander et al., 2003).

Para a banda $[0.5 - 10] \text{ keV}$, a sensibilidade do C-COSMOS é de $5.7 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Assim, não é de esperar que existam fontes neste levantamento com fluxos abaixo deste valor. De forma análoga ao que foi feito para o rádio, podemos estimar o limite inferior para a luminosidade das fontes no catálogo, tendo em conta o *redshift*. Assumindo novamente valores de *redshift* com $\Delta z = 0.1$ em $0.4 \leq z \leq 1.0$, obtemos os valores apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Valores para os limites inferiores de luminosidade no C-COSMOS.

z	$1\sigma \text{ (erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$	$L_X \text{ (erg s}^{-1}\text{)}$
0.4	5.7×10^{-16}	2.60×10^{41}
0.5	5.7×10^{-16}	4.26×10^{41}
0.6	5.7×10^{-16}	6.39×10^{41}
0.7	5.7×10^{-16}	8.99×10^{41}
0.8	5.7×10^{-16}	1.21×10^{42}
0.9	5.7×10^{-16}	1.57×10^{42}
1.0	5.7×10^{-16}	1.99×10^{42}

Na figura 3.11 encontra-se um gráfico da luminosidade (L_X) das 14 galáxias sem bojo com identificação no rádio, em função do *redshift* (z). Tal como seria de esperar, todas as fontes encontram-se acima da linha que define o limite inferior para a luminosidade das fontes no catálogo C-COSMOS. Segundo o critério estabelecido, na amostra de 14 galáxias sem bojo, todas possuem um núcleo galáctico ativo. Isto corresponde a 100% das galáxias sem bojo com identificação nos raios-X.

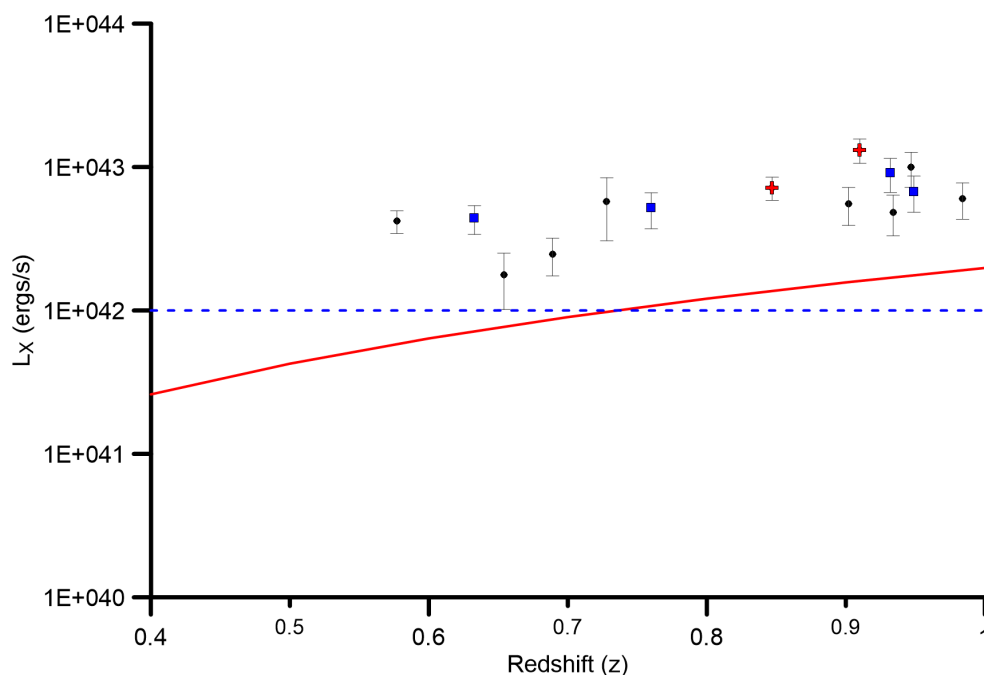


Figura 3.11: Luminosidade nos raios-X em função do *redshift* (z), para as 14 galáxias sem bojo com identificação nos raios-X. A linha contínua a vermelho representa o limite inferior para a luminosidade das fontes no catálogo C-COSMOS. A linha tracejada a azul corresponde a uma luminosidade de $L_X \geq 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$, acima da qual todas as fontes são consideradas AGN. Os pontos pretos, representam fontes sem informação acerca do seu *hardness ratio* (HR), enquanto que os quadrados azuis e cruzeiros vermelhas representam, respetivamente, AGNs tipo 1 e tipo 2. O eixo dos yy, que corresponde à luminosidade nos raios-X (L_X), encontra-se em escala logarítmica.

3.3.3 AGNs em infravermelho

Como vimos no capítulo 2, algumas galáxias ativas possuem uma grande quantidade de poeira em torno da sua região central. Esta poeira faz com que a maioria da radiação emitida pelo núcleo galáctico ativo, entre o ótico e os raios-X, seja absorvida ou dispersada. Ao absorver esta radiação incidente, a poeira vai emitir radiação térmica do tipo corpo negro com emissão máxima na região do infravermelho (Nenkova et al., 2008). Isto faz com que este tipo de galáxia ativa possua, ao contrário de uma galáxia normal (mesmo quando numa fase de elevada taxa de formação estelar), uma distribuição espectral de energia com muito mais luminosidade nesta banda do espectro eletromagnético (figura 3.12). Tendo isto em conta, nos últimos anos têm sido conduzidos diversos estudos de análise das cores de infravermelho de galáxias, com o propósito de distinguir galáxias ativas e normais. Ao utilizar os filtros a bordo do Spitzer, Lacy et al. (2004)

e Stern et al. (2005) notaram que tal é possível. Com o aumento de exposição das imagens disponíveis, percebeu-se que estes critérios inicialmente propostos apresentam falhas na classificação de galáxias a mais altos *redshifts*. Assim, novos critérios foram propostos, alguns considerando outros filtros disponíveis noutros observatórios (Donley et al., 2012; Messias et al., 2012; Assef et al., 2013).

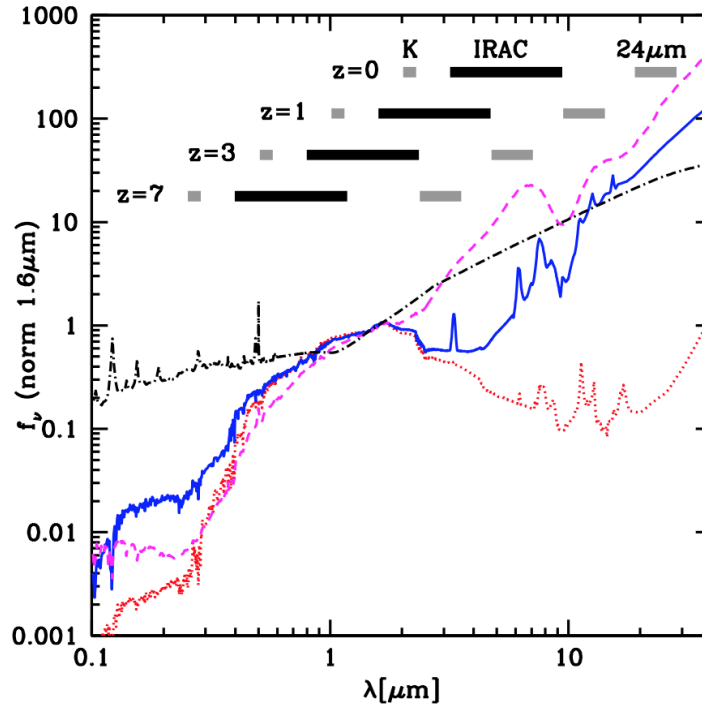


Figura 3.12: Emissão no infravermelho para diferentes tipos de galáxias. A linha formada por pontos vermelhos, representa a emissão de uma galáxia S0 enquanto que a linha azul sólida uma galáxia com uma elevada taxa de formação estelar. A linha magenta a tracejado representa a emissão de uma galáxia ativa e a linha a preto um QSO pouco obscurecido. Na imagem podemos ainda ver que regiões do espectro das galáxias são observadas para diferentes *redshifts*, nos comprimentos de onda K, do IRAC e do MIPS (24 μm). Créditos: Messias et al. (2012).

De forma a se proceder à identificação de candidatos a AGN, no infravermelho, na nossa amostra de galáxias sem bojo, foi utilizado um critério baseado também na cor no infravermelho destes objetos (Messias et al., 2012). O critério em questão, designado por *KI*, faz uso da combinação de duas cores ($K_s - [4.5]$ e $[4.5] - [8.0]$), obtidas a partir das magnitudes observadas, sendo definido pelas seguintes condições:

$$K_s - [4.5] > 0 \quad \text{e} \quad [4.5] - [8.0] > 0$$

onde K_s , [4.5] e [8.0] são, respetivamente, as magnitudes (no sistema AB) nas bandas $2.15 \mu m$, $4.5 \mu m$ (infravermelho próximo) e $8.0 \mu m$ (infravermelho médio).

No catálogo S-COSMOS as magnitudes totais (AB) a $4.5 \mu m$ e $8.0 \mu m$, foram calculadas através dos fluxos totais respetivos, de acordo com³:

$$m_{total} = -2.5 \log(f_{total}) + 23.9$$

No catálogo do UltraVISTA COSMOS, os valores das magnitudes totais na banda K_s já estão no sistema AB, não tendo sido necessário efetuar qualquer procedimento adicional.

Como o critério KI necessita de informação fotométrica relativa às bandas K_s (UltraVISTA COSMOS) e $4.5 \mu m$ e $8.0 \mu m$ (S-COSMOS), interessa apenas considerar as fontes da nossa amostra que possuam informação fotométrica simultaneamente nas três bandas. Desta forma, efetuou-se uma correlação simples entre os dois catálogos (UltraVISTA COSMOS e S-COSMOS), utilizando os seus números de identificação (ID) no catálogo-B, com o objetivo de identificar estas fontes. Ficámos então com um número final de 1902 galáxias sem bojo com fotometria simultânea nas 3 bandas de interesse. Para estas foi então aplicado o critério KI, que pode ser visualizado no gráfico na figura 3.13.

Embora o nosso catálogo de galáxias sem bojo esteja, à partida, desprovido de fontes pontuais, poderá ter ocorrido algum erro no processo de exclusão destas fontes ou de classificação morfológica através dos algoritmos usados para o efeito (secção 3.1). O critério KI é útil não só para identificarmos AGNs mas também estrelas. De facto, existe um conjunto de fontes que no diagrama cor-cor parecem compatíveis com tal classificação (círculos verdes) - ver Messias et al. (2012). Após confirmação visual destas fontes, confirmou-se que de facto se tratavam de estrelas, e como tal foram removidas da nossa amostra. Na figura 3.14 podemos ver a imagem de uma destas fontes.

Segundo o critério estabelecido, na amostra de 1894 (1902 – 8 estrelas) galáxias sem bojo, foram identificados 96 candidatos a galáxias com um núcleo galáctico ativo. Isto corresponde a $\sim 5\%$ das galáxias sem bojo com identificação simultânea nas três bandas de interesse.

3.4 A amostra final de galáxias sem bojo

Nas secções anteriores, foram identificados 111 candidatos a AGN na nossa amostra de galáxias sem bojo. Contudo, para cada um destes candidatos identificados no rádio, infravermelho e raios-X, pode existir uma classificação positiva em duas ou mais destas

³A relação de conversão foi obtida no *S-COSMOS IRAC Photometry Catalog Definitions* em http://irsa.ipac.caltech.edu/data/COSMOS/tables/scosmos/scosmos_irac_200706_colDescriptions.html.

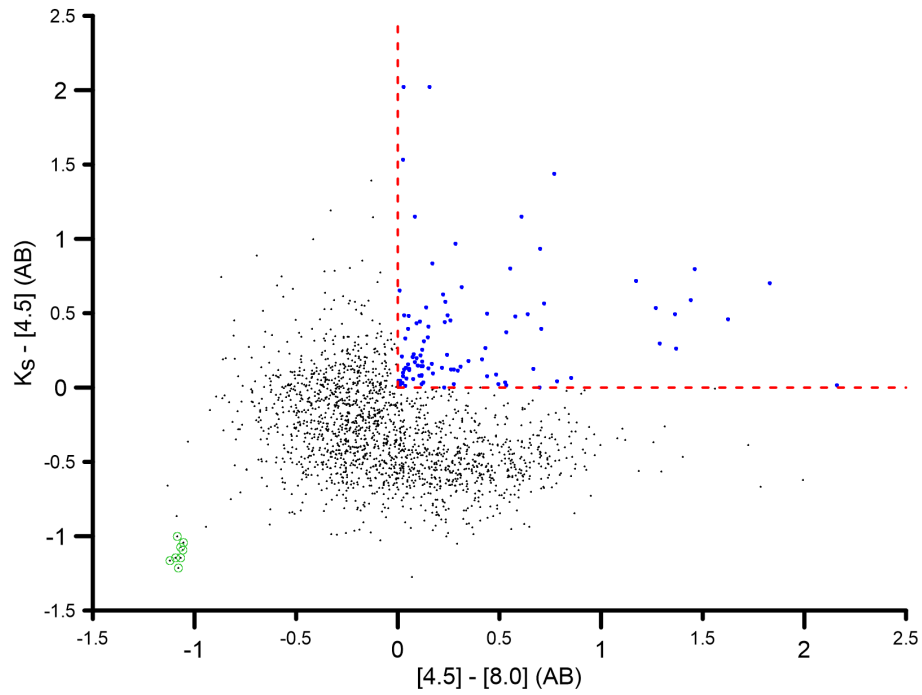


Figura 3.13: Distribuição, no espaço de cores no infravermelho, das 1902 galáxias sem bojo com identificação simultânea em K_s , $4.5 \mu m$ e $8.0 \mu m$. As linhas vermelhas a tracejado traduzem os limites impostos pelo critério KI e as fontes a azul são os 96 candidatos a AGN na nossa amostra. As fontes com um círculo verde são estrelas, fontes pontuais contaminantes no catálogo-B.

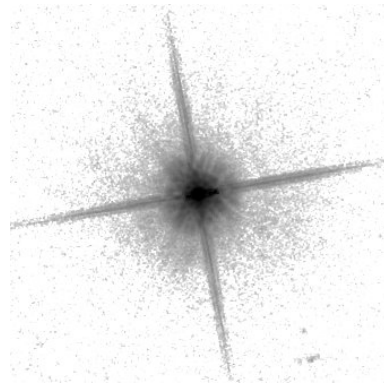


Figura 3.14: Imagem de uma das fontes contaminantes na amostra de galáxias sem bojo. A fonte possui $ID = 20146036$ no catálogo-B. Créditos: NASA/ IPAC Infrared Science Archive.

bandas. De forma a determinar o número total efetivo de candidatos a AGN na nossa amostra de galáxias sem bojo, realizou-se uma correspondência entre todas as fontes candidatas nas três bandas estudadas. Esta correspondência foi realizada de acordo com o seu número de identificação no ótico (ID) presente no catálogo-B, e resultou num número total de três fontes cuja natureza AGN é confirmada por mais de um critério (1 fonte com AGN identificado no rádio e infravermelho e outras duas com AGNs identificados nos raios-X e infravermelho). Assim, o número total efetivo de candidatos a AGN encontrado foi de 108.

Com o objetivo de ficarmos com uma amostra de galáxias sem bojo, sem a presença de fontes com um núcleo galáctico ativo, procedeu-se à remoção destas 108 fontes do catálogo-B. Assim, das 14 139 fontes iniciais, ficámos com 14 031. Para além disto, foram removidas também as oito fontes pontuais (estrelas) contaminantes identificadas na secção 3.3.3, reduzindo então o número efetivo de galáxias sem bojo e sem AGNs para 14 023.

Desta forma, a nossa amostra final de galáxias sem bojo compreende um total de 14 023 fontes sem AGNs, sendo que 87 possuem deteção em radiofrequências e 13 936 não (tabela 3.8).

A baixa percentagem ($\sim 0.8\%$) de galáxias sem bojo ativas identificadas na amostra confirma que não é esperado que existam muitas galáxias sem bojo com núcleos galácticos ativos, dado que existem várias correlações entre a massa do buraco negro central e várias propriedades dos bojos que levam a crer que estas duas estruturas co-evoluem em conjunto (por exemplo: Magorrian et al., 1998; Tremaine et al. (2002); Marconi Hunt, 2003). Contudo, não deixa de ser muito interessante a descoberta destas 108 galáxias sem bojo extremas com um AGN - por serem raras e de difícil explicação teórica, serão certamente objetos dignos de estudos posteriores (ver capítulo 5).

Munidos desta amostra, vamos agora tentar estimar de uma forma precisa a taxa de formação estelar (TFE) que as galáxias sem bojo possuem, entre *redshifts* de 0.4 e 1.

Tabela 3.8: Número de fontes na amostra final de galáxias não ativas sem bojo a *redshifts* intermédios $0.4 \leq z \leq 1$.

Deteção no Rádio	Número de Fontes
Sim	87
Não	13 936

Capítulo 4

A TFE de Galáxias sem Bojo

Após a seleção de um catálogo final de galáxias sem bojo, livres da presença de núcleos galácticos ativos, estamos agora em condições de estimar a taxa de formação estelar para estes objetos. Nesta amostra, apenas 0.6% das galáxias possuem identificação em radiofrequências. Para estas, a determinação das suas taxas de formação estelar é um processo relativamente direto, usando relações de calibração. Contudo, para o resto da amostra (99.4%), que não possui detecção no rádio, é necessário recorrer a métodos estatísticos. Neste capítulo, são apresentadas as estimativas das taxas de formação estelar para as galáxias sem bojo e a metodologia utilizada para as obter.

4.1 Galáxias sem bojo com detecção no rádio

Na amostra de 14 023 galáxias sem bojo a *redshifts* intermédios, livre da presença de AGNs, em estudo nesta dissertação, apenas 87 possuem identificação no rádio (tabela 3.8). Para estas 87 fontes, é possível estimar de uma forma direta a taxa de formação estelar ($\Psi(M_{\odot} \text{ ano}^{-1})$), usando o fluxo no rádio como indicador. Para este efeito foi usada a calibração de Bell (2003) dada por:

$$\Psi(M_{\odot} \text{ ano}^{-1}) = \begin{cases} 5.52 \times 10^{-22} L_{1.4GHz}, & L_{1.4GHz} > 6.4 \times 10^{21} (W Hz^{-1}) \\ \frac{5.52 \times 10^{-22}}{0.1 + 0.9 \left(\frac{L_{1.4GHz}}{6.4 \times 10^{21}} \right)^{0.3}} L_{1.4GHz}, & L_{1.4GHz} \leq 6.4 \times 10^{21} (W Hz^{-1}) \end{cases} \quad (4.1)$$

onde $L_{1.4GHz}$ é a densidade de luminosidade no rádio a $1.4GHz$.

Na figura 4.1 é possível observarmos um gráfico destas taxas de formação estelar em função do *redshift*. Na tabela 4.1 encontram-se apresentados os valores médios destas taxas de formação estelar em intervalos de *redshift*, com $\Delta z = 0.1$, entre $z = 0.4$ e $z = 1.0$. Estes valores médios foram obtidos calculando a densidade de luminosidade média em cada intervalo de *redshift*.

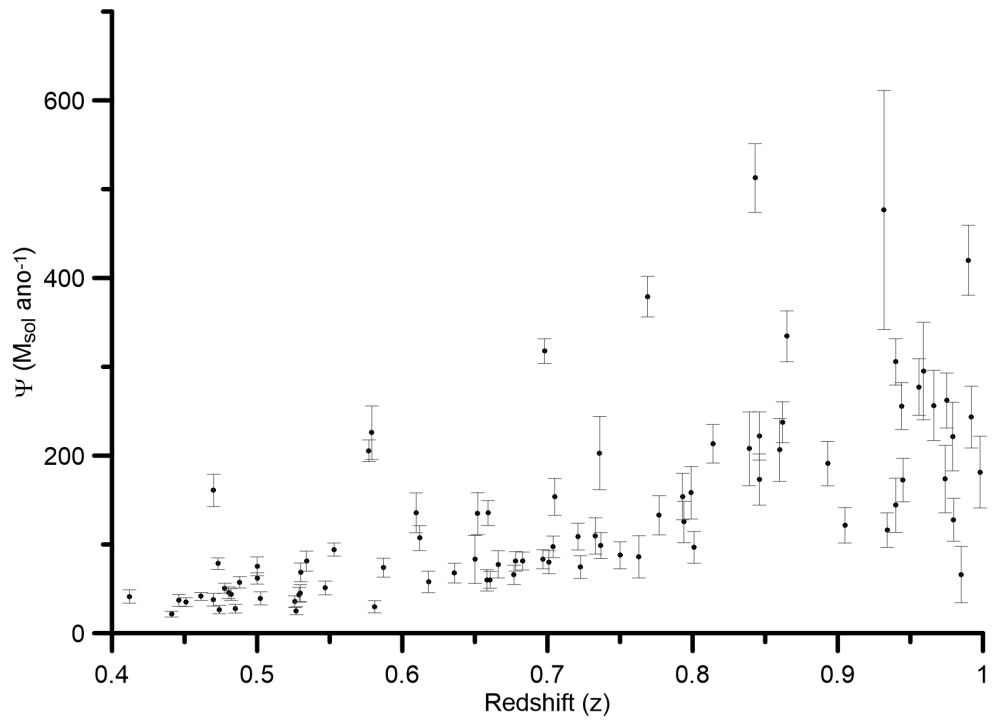


Figura 4.1: Taxa de formação estelar ($\Psi(M_{\odot} \text{ ano}^{-1})$) calculada a partir da emissão em rádio de galáxias sem bojo detetadas neste comprimento de onda, em função do *redshift* (z). As barras de erro foram determinadas a partir do erro na medição do fluxo.

Tabela 4.1: Valores médios, em intervalos de *redshift* (Δz), da taxa de formação estelar ($\langle \Psi \rangle$) para a amostra de 87 galáxias sem bojo com detecção no rádio. Na tabela, N é o número de fontes em cada intervalo Δz e $\langle L_{1.4GHz} \rangle$ é a densidade de luminosidade média das fontes em cada intervalo de *redshift*.

Δz	N	$\langle L_{1.4GHz} \rangle (W Hz^{-1})$	$\langle \Psi \rangle (M_{\odot} ano^{-1})$
[0.4 – 0.5[	14	9.11×10^{22}	50.29
[0.5 – 0.6[	15	1.39×10^{23}	76.96
[0.6 – 0.7[	15	1.87×10^{23}	103.13
[0.7 – 0.8]	15	2.47×10^{23}	136.49
[0.8 – 0.9[	10	4.34×10^{23}	239.43
[0.9 – 1.0]	18	4.14×10^{23}	228.65

4.2 Galáxias sem bojo sem detecção no rádio

Das 14 023 galáxias sem bojo e sem a presença de um AGN que fazem parte da amostra em estudo, 13 936 não possuem detecção no rádio (tabela 3.8) e por isso não é possível estimar as suas taxas de formação estelar diretamente a partir do fluxo medido em radiofrequências.

A obtenção de imagens em astronomia está sujeita a um nível de ruído proveniente, por exemplo, dos instrumentos de detecção ou do próprio céu. Quando o sinal de uma fonte se encontra abaixo ou perto desse nível, não é possível distinguir essa fonte do ruído de fundo da imagem. Isto faz com que todas as observações possuam um limite abaixo do qual a detecção das fontes não é fiável, ou estas simplesmente não são detetáveis (sensibilidade). Porém, dadas as características aleatórias do ruído, é possível utilizar técnicas estatísticas para o reduzir, por exemplo, através de *stacking*. Com este método é possível determinar uma média do fluxo de fontes, anteriormente abaixo do nível de ruído, combinando diversas imagens. O ruído tende a diminuir (com \sqrt{N} , onde N é o número de imagens) tendencialmente para valores próximos de zero, enquanto que o sinal mantém-se, fazendo assim com que este se destaque do ruído de fundo da imagem e se torne numa detecção.

Tendo em conta o que foi descrito anteriormente, as fontes sem detecção na nossa amostra foram divididas em intervalos de *redshift*, com $\Delta z = 0.1$, entre $z = 0.4$ e $z = 1.0$ (tabela 4.2). Foi realizado o *stacking* em cada um destes intervalos para determinar a média dos fluxos destas fontes, utilizando um algoritmo específico (criado por Hugo Messias) para o efeito. No que se segue, descreve-se sucintamente o método utilizado.

Foram criados recortes de 171×171 pixeis (equivalente a $60'' \times 60''$), a partir da imagem do VLA-COSMOS, centrados na posição das fontes sem detecção. Estas di-

Tabela 4.2: Número (N) de galáxias sem bojo sem identificação no rádio, por intervalo de *redshift* (Δz).

Δz	N
[0.4 – 0.5[	1976
[0.5 – 0.6[	1740
[0.6 – 0.7[	2267
[0.7 – 0.8]	2697
[0.8 – 0.9[	2560
[0.9 – 1.0]	2696

mensões foram escolhidas com o objetivo de identificar de forma mais fácil a existência de fontes vizinhas que possam interferir com os valores de fluxo na posição da fonte sem detecção. Simultaneamente, estas dimensões permitem ter uma melhor ideia do ruído na vizinhança da fonte sem detecção.

Procedeu-se de seguida ao cálculo do ruído de cada recorte individual, calculando o desvio padrão (σ) dos valores dos seus pixels. Foram rejeitados todos os recortes cujo valor de σ fosse superior a cinco vezes o valor característico do ruído da imagem inicial do VLA-COSMOS ($5\sigma_{VLA} = 60 \mu J$). Este processo teve o intuito de rejeitar todos os recortes cujo ruído pudesse ter origem em fontes brilhantes presentes no recorte, ou por este ter sido realizado numa zona limite da imagem.

Dos recortes mantidos no processo anterior, foi calculado o desvio padrão (ruído) de cada recorte, rejeitando todos os pixels com valores acima de 3σ . Este processo, designado por 3σ *clipping* foi repetido mais duas vezes para garantir um cálculo do ruído do recorte com a menor contaminação possível por pixels não representativos (por exemplo, devido à presença de fontes). Após a terceira iteração, ficámos então com um valor de σ para cada recorte e o peso associado dado por $1/\sigma^2$.

O passo seguinte foi combinar todos os recortes realizando uma média ponderada entre cada pixel correspondente em cada recorte. De forma a garantir que a média ponderada não fosse afetada por pixels *outliers*, foi anteriormente realizado mais um 3σ *clipping*. A média ponderada foi calculada tendo em conta os pesos dos recortes obtidos no processo anterior, de forma a que o resultado tenha mais em conta pixels provenientes de recortes com menos ruído do que naqueles com mais ruído. Este processo, habitualmente usado para minimizar a contribuição de pixels "quentes", pode afetar a determinação do fluxo médio das fontes não detetadas, embora esse efeito deva ser desprezável.

Este processo deu origem a uma imagem final que é a média ponderada de todas as outras imagens. Para determinar o ruído efetivo desta imagem, calculou-se o desvio

padrão (σ_s) dos valores dos pixels na imagem final, com exceção dos pixels centrais, onde se espera obter uma detecção. O valor do fluxo da detecção (f_s) é dado pelo valor mais elevado de fluxo entre os pixels centrais. Na tabela 4.3 podemos ver os resultados obtidos no *stacking*.

Tabela 4.3: Resultados do *stacking* da amostra de 13 936 galáxias sem bojo sem detecção no rádio. O *stacking* foi realizado em intervalos de *redshift*, com $\Delta z = 0.1$, entre $z = 0.4$ e $z = 1.0$. Nesta tabela, N é o número de fontes em cada intervalo de *redshift* (Δz), f_s é o valor do fluxo da detecção, σ_s o valor do ruído e S/N é a razão entre o sinal e o ruído.

Δz	N	f_s (μJy)	σ_s	S/N
$[0.4 - 0.5[$	1976	2.62	0.31	8.45
$[0.5 - 0.6[$	1740	3.44	0.36	9.56
$[0.6 - 0.7[$	2267	3.36	0.29	11.59
$[0.7 - 0.8]$	2697	3.27	0.29	11.28
$[0.8 - 0.9[$	2560	3.73	0.29	12.86
$[0.9 - 1.0]$	2696	3.63	0.29	12.52

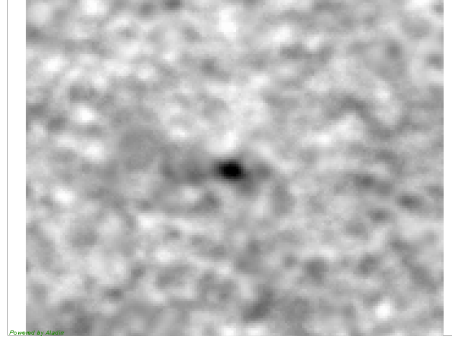


Figura 4.2: Imagem final resultante do *stacking* em radiofrequências de 1976 galáxias sem bojo, no intervalo de *redshift* $[0.4 - 0.5[$.

Os fluxos médios resultantes do *stacking* foram usados para determinar a densidade de luminosidade média das fontes sem detecção, em cada intervalo de *redshift* (Δz). Para tal, foi utilizada novamente a equação 3.1 assumindo para cada Δz o valor central de *redshift* do intervalo. Uma vez tendo esta densidades de luminosidade média, foi possível estimar a taxa média de formação estelar, recorrendo novamente à calibração de Bell (2003), para cada intervalo de *redshift*. Os resultados estão apresentados na tabela 4.4 e figura 4.3, onde acrescentámos aos dados da figura 4.1 os valores médios calculados para a taxa de formação estelar das galáxias sem bojo sem detecção no rádio.

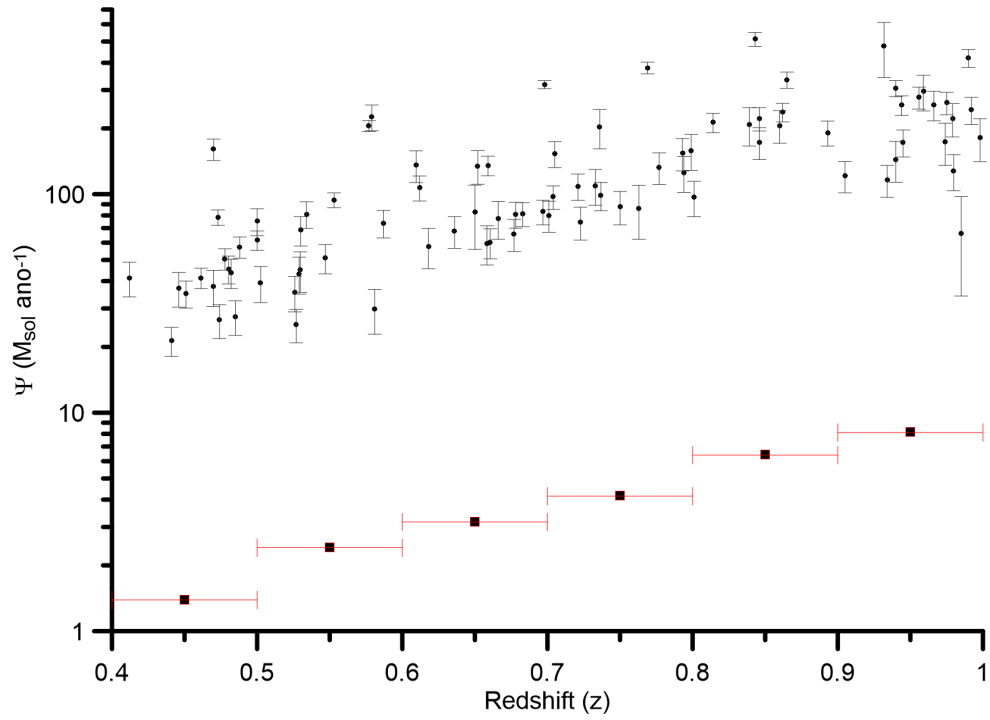


Figura 4.3: Taxa de formação estelar ($\Psi(M_{\odot} \text{ ano}^{-1})$) de galáxias sem bojo com detecção no rádio (bolas pretas), e taxas de formação estelar médias de galáxias sem bojo sem detecção no rádio (quadrados pretos com contorno vermelho), em função do *redshift* (z). O eixo dos yy encontra-se em escala logarítmica.

Tabela 4.4: Valores médios, em intervalos de *redshift* (Δz), da taxa de formação estelar média ($\langle \Psi \rangle$) para a amostra de galáxias sem bojo sem detecção no rádio. Na tabela, $\langle L_{1.4GHz} \rangle$ é a densidade de luminosidade média das fontes em cada intervalo de *redshift*.

Δz	$\langle L_{1.4GHz} \rangle (WHz^{-1})$	$\langle \Psi \rangle (M_{\odot}ano^{-1})$
[0.4 – 0.5[	1.79×10^{21}	1.39
[0.5 – 0.6[	3.79×10^{21}	2.41
[0.6 – 0.7[	5.49×10^{21}	3.16
[0.7 – 0.8]	7.53×10^{21}	4.15
[0.8 – 0.9[	1.16×10^{22}	6.39
[0.9 – 1.0]	1.47×10^{22}	8.12

Como podemos constatar, tendo em conta os resultados obtidos para as taxas de formação estelar de galáxias sem bojo na nossa amostra, a vasta maioria destes objetos (99.4%) apresenta valores relativamente baixos de TFE (média abaixo de $\sim 8M_{\odot}ano^{-1}$), sendo diretamente detetadas apenas cerca de 0.6% de galáxias sem bojo, com fluxos no rádio correspondentes a TFE muito elevadas ($\sim 50 - 230M_{\odot}ano^{-1}$). Tal situação reflete o limite de sensibilidade do levantamento de rádio, que apenas permite a detecção direta da "cauda" (menos de 1%) da distribuição de TFE desta população de galáxias.

Estes resultados podem ser interpretados à luz dos modelos de formação de galáxias que sugerem que as galáxias sem bojo não passam por interações fortes com outras galáxias, o que justificaria a observação de TFE baixas. Há aqui que chamar a atenção, contudo, que o número de galáxias sem bojo em uso, é uma fração significativa ($\sim 50\%$) da população de galáxias a estes *redshifts* ($0.4 \leq z \leq 1.0$), e portanto mesmo uma taxa de formação estelar baixa, nesta população abundante, pode resultar numa fração significativa da taxa de formação estelar global no Universo. Por este motivo, a contribuição da TFE destes objetos para a taxa de formação estelar global no Universo deve ser estudada no futuro. Também de interesse será o estudo das galáxias sem bojo reveladas com maiores TFE. Seria de extraordinária importância perceber como é que tais TFE, ao nível de formação estelar explosiva (*starbursts*), podem ser atingidas em galáxias sem bojo, algo que dificilmente é interpretado à luz dos modelos de formação de galáxias já referidos.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Ao longo deste trabalho, pudemos constatar alguns aspetos das galáxias sem bojo, importantes para a compreensão da formação e evolução de galáxias no Universo. Com a determinação das taxas de formação estelar destas galáxias, recorrendo às radiofrequências, obtivemos resultados que nos levam a concluir que as galáxias sem bojo podem apresentar taxas de formação estelar elevadas $\sim 50 - 230 \text{ M}_{\odot} \text{ ano}^{-1}$, mas no entanto a sua vastíssima maioria possui taxas de formação estelar muito mais baixas $\sim 1 - 8 \text{ M}_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Contudo, apesar destas TFE muito baixas, a contribuição das galáxias sem bojo para a taxa de formação estelar global no Universo não deve ser desprezada, visto que este tipo de galáxias contabilizam cerca de 50% das fontes selecionadas no ótico (Griffith et al., 2012).

As galáxias sem bojo têm sido um puzzle para os modelos que tentam recriar os mecanismos de formação e evolução das estruturas que observamos hoje em dia no Universo, não tendo ainda sido possível reproduzir de forma totalmente satisfatória a sua formação no paradigma atual de formação de estruturas - Λ CDM. Os resultados que obtivemos para as taxas de formação estelar das galáxias sem bojo são compatíveis com o modelo que associa as grandes taxas de formação estelar no universo com as grandes interações entre galáxias - algo pelo qual as galáxias sem bojo não deverão ter passado.

Das 14 131 fontes da nossa amostra, classificadas como galáxias sem bojo (contando com a remoção das 8 fontes pontuais contaminantes), 108 foram identificadas como possuindo um núcleo galáctico ativo, o que corresponde a $\sim 0.8\%$ da amostra. No rádio, existe apenas a presença de um AGN inequívoco, nos raios-X 14 e, mesmo a utilização de cores no infravermelho, que provavelmente dão origem a uma indicação por excesso do número de AGNs na amostra, apenas revelou 96 AGNs, o que corresponde a $\sim 0.7\%$ da nossa amostra total. Estes resultados ilustram a raridade da existência de núcleos galácticos ativos (cujo motor será um buraco negro de grande massa) em galáxias sem bojo, algo que é consistente com os modelos de formação de galáxias. Embora exista uma correlação entre a massa do buraco negro central e várias propriedades de bojos ditos "clássicos" (por exemplo: Magorrian et al., 1998; Tremaine et al. (2002); Mar-

coni Hunt, 2003), facilitando a existência de um AGN numa galáxia com bojo (que terá também um buraco negro central de grande massa), tal correlação não é verificada para buracos negros centrais e o disco de galáxias sem bojo que os alberguem (Kormendy et al., 2011). De acordo com a interpretação teórica, a inexistência de colisões que favoreçam o crescimento de um bojo e, simultaneamente, do buraco negro central dificultará, também, o aparecimento de um AGN, pelo que AGNs em galáxias sem bojo deverão ser uma raridade, como verificamos.

Tal como foi referido, como as galáxias sem bojo representam uma percentagem considerável da população de galáxias, embora possuam taxas de formação estelar baixas, como trabalho futuro, deveríamos olhar para a contribuição destas galáxias para a taxa de formação estelar global no Universo. Seria também interessante comparar os resultados para as taxas de formação estelar obtidos neste trabalho, com taxas de formação estelar estimadas usando outros comprimentos de onda, como por exemplo, os ultravioleta ou H_α , o que permitiria estimar a quantidade de poeira existente nestas galáxias. Tal trabalho é atualmente possível, pois o campo do COSMOS foi observado, por exemplo, no ultravioleta pelo *Cosmic Evolution Explorer* (GALEX), uma missão da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Para além disto, foram conduzidos outros levantamentos de banda estreita (usando filtros estreitos) que poderiam ser utilizados para a identificação rápida de emissão de H_α em *redshifts* específicos no intervalo de $0.4 \leq z \leq 1.0$.

Seria também de extrema importância olhar para as galáxias ativas reveladas na nossa amostra de galáxias sem bojo e tentar perceber o que elas significam para os modelos de formação de galáxias, dado que não é esperado que existam AGNs, ou seja buracos negros de grande massa, em galáxias sem bojo. Também seria extremamente importante estudar em mais detalhe as galáxias sem bojo com taxas de formação estelar elevadas (*starbursts*) de forma a perceber como é que tais TFE podem ser atingidas nestes objetos, pois não são esperados tais valores nos modelos atuais de formação de galáxias, nos quais as galáxias sem bojo não passam por interações fortes ao longo da sua vida. Tanto as galáxias sem bojo ativas como as galáxias sem bojo *starburst* são casos extremos ainda mais difíceis de explicar à luz dos modelos atuais de formação de galáxias, pelo que mais rapidamente podem indicar onde estes modelos precisam de ser melhorados.

Este estudo pode ainda ser estendido para outras observações do Hubble (por exemplo: *All-wavelength Extended Groth strip International Survey* (AEGIS); *Galaxy Evolution From Morphology And SEDs* (GEMS); *The Great Observatories Origins Surveys* (GOODS)) ou melhor ainda, para as futuras observações do EUCLID, dado que a qualidade de imagem será semelhante à do Hubble e o levantamento irá cobrir uniformemente uma região do céu consideravelmente mais ampla ($\sim 15000^\circ 2$) que a área de $\sim 2^\circ 2$ coberta pelo COSMOS.

O EUCLID é uma missão espacial da *European Space Agency*, com lançamento pre-

visto para 2020 e tem como objetivo mapear a estrutura do Universo através da medição de dados morfológicos e *redshifts* de cerca de 2 mil milhões de galáxias até $z \sim 2$. Este telescópio espacial, que possuirá uma abertura de 1.2 m, vai providenciar aos astrónomos um quantidade de dados morfológicos e posicionais sem precedentes.

A qualidade de imagem extraordinária do EUCLID associada aos dados morfológicos e de *redshifts* para uma grande número de galáxias, detetadas numa área que compreende aproximadamente um terço do céu, permitirá alargar o estudo realizado nesta dissertação e potencialmente explicar o papel das galáxias sem bojo no contexto de formação e evolução de galáxias no Universo. O Euclid é uma missão ESA que conta com uma forte participação nacional, pelo que será certamente de considerar este como um projeto capaz de potenciar os resultados científicos que a Astrofísica portuguesa será capaz de obter da missão.

Bibliografia

- Abadi, M. G., Navarro, J. F., Steinmetz, M., Eke, V. R. (2003). Simulations of Galaxy Formation in a Λ Cold Dark Matter Universe. II. The Fine Structure of Simulated Galactic Disks. *The Astrophysical Journal*, 597, 21-34.
- Afonso, J., Georgakakis, A., Almeida, C., Hopkins, A. M., Cram, L. E., Mobasher, B., et al. (2005a). The Phoenix Deep Survey: Spectroscopic Catalog. *The Astrophysical Journal*, 624, 135-154.
- Afonso, J., Mobasher, B., Koekemoer, A., Norris, R. P., Cram, L. (2005b). Optical and X-Ray Identification of Faint Radio Sources in the GOODS CDF-S Advanced Camera for Surveys Field. *The Astronomical Journal*, 131, 1216-1230.
- Akiyama, M., Ohta, K., Yamada, T., Kashikawa, N., Yagi, M., Kawasaki, W., et al. (2000). Optical Identification of the ASCA Large Sky Survey. *The Astrophysical Journal*, 532, 700-727.
- Alexander, D. M., Bauer, F. E., Brandt, W. N., Schneider, D. P., Hornschemeier, A. E., Vignali, C., et al. (2003). The Chandra Deep Field North Survey. XIII. 2 Ms Point-Source Catalogs. *The Astronomical Journal*, 126, 539-574.
- Assef, R. J., Stern, D., Kochanek, C. S., Blain, A. W., Brodwin, M., Brown, M. J. I., et al. (2013). Mid-infrared Selection of Active Galactic Nuclei with the Wide-field Infrared Survey Explorer. II. Properties of WISE-selected Active Galactic Nuclei in the NDWFS Boötes Field. *The Astrophysical Journal*, 772, 26 (18pp).
- Barnes, J. E. (2002). Formation of gas discs in merging galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 333, 481-494.
- Bauer, F. E., Alexander, D. M., Brandt, W. N., Hornschemeier, A. E., Vignali, C., Garmire, G. P., et al. (2002). The Chandra Deep Field North Survey. XII. The Link between Faint X-Ray and Radio Source Populations. *The Astronomical Journal*, 124, 2351-2363.

- Bell, E. F. (2003). Estimating Star Formation Rates from Infrared and Radio Luminosities: The Origin of the Radio-Infrared Correlation. *The Astrophysical Journal*, 586, 794-813.
- Bell, E. F., Phleps, S., Somerville, R. S., Wolf, C., Borch, A., Meisenheimer, K. (2006). The Merger Rate of Massive Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 652, 270-276.
- Benson, A. J. (2010). Galaxy Formation Theory. *Physics Reports*, 495, 33-86.
- Bizzocchi, L., Filho, M. E., Leonardo, E., Grossi, M., Griffith, R. L., Afonso, J., et al. (2014). Bulgeless Galaxies at Intermediate Redshift: Sample Selection, Color Properties, and the Existence of Powerful Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, 782, 22 (20pp).
- Bournaud, F., Combes, F. (2002). Gas accretion on spiral galaxies: Bar formation and renewal. *Astronomy and Astrophysics*, 392, 83-102.
- Bournaud, F., Jog, C. J., Combes, F. (2005). Galaxy mergers with various mass ratios: Properties of remnants. *Astronomy and Astrophysics*, 437, 69-85.
- Bournaud, F. (2011). Star formation in galaxy interactions and mergers. *EAS Publications Series*, 51, 107-131.
- Caldwell, J. A. R., McIntosh, D. H., Rix, H.-W., Barden, M., Beckwith, S. V. W., Bell, E. F., et al. (2008). GEMS Survey Data and Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 174, 136-144.
- Calzetti, D. (2013). Star Formation Rate Indicators. In *Secular Evolution of Galaxies*, by Jesús Falcón-Barroso, and Johan H. Knapen, Cambridge, UK: Cambridge University Press (p. 419).
- Ciotti, L., Bertin, G. (1999). Analytical properties of the $R^{1/m}$ law. *Astronomy and Astrophysics*, 352, 447-451.
- Condon, J. J. (1992). Radio emission from normal galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 575-611.
- Davis, M., Guhathakurta, P., Konidakis, N. P., Newman, J. A., Ashby, M. L. N., Biggs, A. D., et al. (2007). The All-Wavelength Extended Groth Strip International Survey (AEGIS) Data Sets. *The Astrophysical Journal Letters*, 660, L1-L6.
- de Vaucouleurs, G. (1948). Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Annales d'Astrophysique*, 11, 247-287.

- de Vaucouleurs, G. (1958). Photoelectric photometry of the Andromeda nebula in the UVB system. *The Astrophysical Journal*, 128, 465-488.
- de Vaucouleurs, G. (1959). Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik*, 53, 275-310.
- Dickinson, M., Giavalisco, M., et al. (2003). The Great Observatories Origins Deep Survey. In *The Mass of Galaxies at Low and High Redshift: Proceedings of the European Southern Observatory and Universitäts-Sternwarte München Workshop Held in Venice, Italy, 24-26 October 2001* (pp. 324-331). Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- D’Onghia, E., Burkert, A. (2004). Bulgeless Galaxies and Their Angular Momentum Problem. *The Astrophysical Journal Letters*, 612, L13-L16.
- Donley, J. L., Koekemoer, A. M., Brusa, M., Capak, P., Cardamone, C. N., Civano, F., et al. (2012). Identifying Luminous Active Galactic Nuclei in Deep Surveys: Revised IRAC Selection Criteria. *The Astrophysical Journal*, 748, 142 (22pp).
- Driver, S. P., Allen, P. D., Graham, A. W., Cameron, E., Liske, J., Ellis, S. C., et al. (2006). The Millennium Galaxy Catalogue: morphological classification and bimodality in the colour-concentration plane. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368, 414-434.
- Elvis, M., Civano, F., Vignali, C., Puccetti, S., Fiore, F., Cappelluti, N., et al. (2009). The Chandra COSMOS Survey. I. Overview and Point Source Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 184, 158-171.
- Fanali, R., Caccianiga, A., Severgnini, P., Della Ceca, R., Marchese, E., Carrera, F. J., et al. (2013). Studying the relationship between X-ray emission and accretion in AGN using the XMM-Newton Bright Serendipitous Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433, 648-658.
- Ferrarese, L., Merritt, D. (2000). A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 539, L9-L12.
- Firmani, C., Avila-Reese, V. (2000). Disc galaxy evolution models in a hierarchical formation scenario: structure and dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 315, 457-472.
- Freeman, K. C. (1970). On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 160, 811-830.
- Gandhi, P. (2005). X-ray studies of active galactic nuclei. *Asian Journal of Physics*, 13, 90-107.

- Giavalisco, M., Ferguson, H. C., Koekemoer, A. M., Dickinson, M., Alexander, D. M., Bauer F. E., et al. (2004). The Great Observatories Origins Deep Survey: Initial Results from Optical and Near-Infrared Imaging. *The Astrophysical Journal Letters*, 600, L93-L98.
- Griffith, R. L., Cooper, M. C., Newman, J. A., Moustakas, L. A., Stern, D., Comerford, J. M., et al. (2012). The Advanced Camera for Surveys General Catalog: Structural Parameters for Approximately Half a Million Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 200, 9-(12pp).
- Häring, N., Rix, H.-W. (2004). On the Black Hole Mass-Bulge Mass Relation. *The Astrophysical Journal*, 604, L89-L92.
- Hernquist, L., Spergel, D. N., Heyl, J. S. (1993). Structure of Merger Remnants. III. Phase-Space Constraints. *Astrophysical Journal*, 416, 415-424.
- Hopkins, P. F., Kereš, D., Murray, N., Quataert, E., Hernquist, L. (2011). Stellar feedback and bulge formation in clumpy discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 968-978.
- Hoyle, F. (1949). In *Problems of Cosmical Aerodynamics*, Proceedings of the Symposium on the Motion of Gaseous Masses of Cosmical Dimensions. Ohio: Central Air Documents Office (195).
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 64, 321-369.
- Ilbert, O., Capak, P., Salvato, M., Aussel, H., McCracken, H. J., Sanders, D. B., et al. (2009). Cosmos Photometric Redshifts with 30-Bands for 2-deg². *The Astrophysical Journal*, 690, 1236-1249.
- Jogee, S., Miller, S. H., Penner, K., Skelton, R. E., Conselice, C. J., Somerville, R. S., et al. (2009). History of Galaxy Interactions and Their Impact on Star Formation Over the Last 7 Gyr from GEMS. *The Astrophysical Journal*, 697, 1971-1992.
- Kennicutt, R. C., Jr. (1998). The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 498, 541-552.
- Kennicutt, R. C., Evans, N. J. (2012). Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 531-608.
- Koekemoer, A. M., Aussel, H., Calzetti, D., Capak, P., Giavalisco, M., Kneib, J.-P., et al. (2007). The COSMOS Survey: Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Observations and Data Processing. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 172, 196-202.

- Kormendy, J. (1993). A critical review of stellar-dynamical evidence for black holes in galaxy nuclei. In *The nearest active galaxies - Proceedings of the meeting on The nearest active galaxies, held in Madrid in May 1992* (pp. 197-218). Espanha: CSIC Press.
- Kormendy, J., Kennicutt, R. C. Jr. (2004). Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42, 603-683.
- Kormendy, J., Bender, R., Cornell, M. E. (2011). Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges. *Nature*, 469, 374-376.
- Lacey, C. G. (1984). The influence of massive gas clouds on stellar velocity dispersions in galactic discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 208, 687-707.
- Lacy, M., Storrie-Lombardi, L. J., Sajina, A., Appleton, P. N., Armus, L., Chapman, S. C., et al. (2004). Obscured and Unobscured Active Galactic Nuclei in the Spitzer Space Telescope First Look Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 154, 166-169.
- Larson, D., Dunkley, J., Hinshaw, G., Komatsu, E., Nolte, M. R., Bennett, C. L., et al. (2011). Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Power Spectra and WMAP-derived Parameters. *The Astrophysical Journal Supplement*, 192, (19 pp.).
- Lehmann, I., Hasinger, G., Schmidt, M., Giacconi, R., Trümper, J., Zamorani, G., et al. (2001). The ROSAT Deep Survey. VI. X-ray sources and Optical identifications of the Ultra Deep Survey. *Astronomy and Astrophysics*, 371, 833-857.
- Lilly, S. J., Le Fèvre, O., Renzini, A., Zamorani, G., Scodeggio, M., Contini, T., et al. (2007). zCOSMOS: A Large VLT/VIMOS Redshift Survey Covering $0 < z < 3$ in the COSMOS Field. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 172, 70-85.
- Lin, C. C., Shu, F. H. (1964). On the Spiral Structure of Disk Galaxies. *Astrophysical Journal*, 140, 646-655.
- Lynden-Bell, D. (1967). Statistical mechanics of violent relaxation in stellar systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 136, 101-121.
- Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., et al. (1998). The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers. *The Astronomical Journal*, 115, 2285-2305.

- Mainieri, V., Bergeron, J., Hasinger, G., Lehmann, I., Rosati, P., Schmidt, M., et al. (2002). XMM-Newton observation of the Lockman Hole. II. Spectral analysis. *Astronomy and Astrophysics*, 393, 425-438.
- Marconi, A., Hunt, L. K. (2003). The Relation between Black Hole Mass, Bulge Mass, and Near-Infrared Luminosity. *The Astrophysical Journal*, 589, L21-L24.
- McCracken, H. J., Milvang-Jensen, B., Dunlop, J., Franx, M., Fynbo, J. P. U., Le Fèvre, O., et al. (2012). UltraVISTA: a new ultra-deep near-infrared survey in COSMOS. *Astronomy and Astrophysics*, 544, A156.
- Messias, H., Afonso, J., Salvato, M., Mobasher, B., Hopkins, A. M. (2012). A New Infrared Color Criterion for the Selection of $0 < z < 7$ AGNs: Application to Deep Fields and Implications for JWST Surveys. *The Astrophysical Journal*, 754, 120 (16pp).
- Mo H., van den Bosch, F., White, S. (2010). *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge University Press.
- Murphy, E. J., Condon, J. J., Schinnerer, E., Kennicutt, R. C., Calzetti, D., Armus, L., et al. (2011). Calibrating Extinction-free Star Formation Rate Diagnostics with 33 GHz Free-free Emission in NGC 6946. *The Astrophysical Journal*, 737, 67-83.
- Mushotzky, R. (2004). How are AGN Found?. In *Supermassive Black Holes in the Distant Universe* (pp. 53-87). Netherlands: Springer Netherlands.
- Navarro, J. F., White, S. D. M. (1994). Simulations of dissipative galaxy formation in hierarchically clustering universes-2. Dynamics of the baryonic component in galactic haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 267, 401-412.
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., White, S. D. M. (1995). The assembly of galaxies in a hierarchically clustering universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 275, 56-66.
- Nenkova, M., Sirocky, M. M., Ivezić, Ž., Elitzur, M. (2008). AGN Dusty Tori. I. Handling of Clumpy Media. *The Astrophysical Journal*, 685, 147-159.
- Padovani, P., Bonzini, M., Miller, N., Kellermann, K. I., Mainieri, V., Rosati, P., et al. (2014). The AGN content of deep radio surveys and radio emission in radio-quiet AGN. Why every astronomer should care about deep radio fields. In *Multiwavelength AGN Surveys and Studies, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium* (pp. 79-85).
- Peng, C. Y. (2003). *GALFIT User's Manual*. Consultado em 1 de Agosto de 2016, Carnegie Institution for Science: <https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/README.pdf>.

- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., Rix, H.-W. (2012). Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images. *The Astronomical Journal*, 124, 266-293.
- Peterson, B. M. (1997). *An Introduction to Active Galactic Nuclei*, Cambridge University Press, 1st edition.
- Pour-Imani, H., Kennefick, D., Kennefick, J., Davis, B. L., Shields, D.W., Abdeen, M. S. (2016). Strong Evidence for the Density-wave Theory of Spiral Structure in Disk Galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 827, L2-L8.
- Riechers, D. A., Bradford, C. M., Clements, D. L., Dowell, C. D., Pérez-Fournon, I., Ivison, R. J., et al. (2013). A dust-obscured massive maximum-starburst galaxy at a redshift of 6.34. *Nature*, 496, 329-333.
- Risaliti, G., Elvis, M. (2004). A Panchromatic View of AGN. In *Supermassive Black Holes in the Distant Universe*, (p.187). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Roberts, M. S., Haynes, M. P. (1994). Physical Parameters along the Hubble Sequence. *Annual Review Astronomy and Astrophysics*, 32, 115-152.
- Robertson, B., Bullock, J. S., Cox, T. J., Di Matteo, T., Hernquist, L., Springel, V., et al. (2006). A Merger-driven Scenario for Cosmological Disk Galaxy Formation. *The Astrophysical Journal*, 645, 986-1000.
- Sanders, D. B., Soifer, B. T., Elias, J. H., Madore, B. F., Matthews, K., Neugebauer, G., et al. (1988). Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars. *Astrophysical Journal*, 325, 74-91.
- Sanders, D. B., Salvato, M., Aussel, H., Ilbert, O., Scoville, N., Surace, J. A., et al. (2007). S-COSMOS: The Spitzer Legacy Survey of the Hubble Space Telescope ACS 2 deg² COSMOS Field I: Survey Strategy and First Analysis. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 172, 86-98.
- Schinnerer, E., Sargent, M. T., Bondi, M., Smolčić, V., Datta, A., Carilli, C. L., et al. (2010). The VLA-COSMOS Survey. IV. Deep Data and Joint Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 188, 384-404.
- Schmitt, H. R., Calzetti, D., Armus, L., Giavalisco, M., Heckman, T. M., Kennicutt, R. C., Jr., et al. (2006). Ultraviolet-to-Far-Infrared Properties of Local Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 643, 173-185.
- Scoville, N., Aussel, H., Brusa, M., Capak, P., Carollo, C. M., Elvis, M., et al. (2007). The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): Overview. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 172, 1-8.

- Sérsic, J. L. (1968). In Atlas de Galaxias Australes, Cordoba: Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de Cordoba).
- Shen, J., Sellwood, J. A. (2004). The Destruction of Bars by Central Mass Concentrations. *The Astrophysical Journal*, 604, 614-631.
- Simmons, B. D., Lintott, C., Schawinski, K., Moran, E. C., Han, A., Kaviraj, S. (2013). Galaxy Zoo: bulgeless galaxies with growing black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429, 2199-2211.
- Spitzer, L., Jr., Schwarzschild, M. (1953). The Possible Influence of Interstellar Clouds on Stellar Velocities. II.. *Astrophysical Journal*, 118, 106-112.
- Springel, V., Hernquist, L. (2005). Formation of a Spiral Galaxy in a Major Merger. *The Astrophysical Journal*, 622, L9-L12.
- Stalevski, M., Ricci, C., Ueda, Y., Lira, P., Fritz, J., Baes, M. (2016). The dust covering factor in active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458, 2288-2302.
- Steinmetz, M.; Navarro, J. F. (2002). The hierarchical origin of galaxy morphologies. *New Astronomy*, 7, 155-160.
- Stern, D., Eisenhardt, P., Gorjian, V., Kochanek, C. S., Caldwell, N., Eisenstein, D., et al. (2005). Mid-Infrared Selection of Active Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 631, 163-168.
- Sutherland, W., Saunders, W. (1992). On the likelihood ratio for source identification. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 259, 413-420.
- Szokoly, G. P., Bergeron, J., Hasinger, G., Lehmann, I., Kewley, L., Mainieri, V., et al. (2004). The Chandra Deep Field-South: Optical Spectroscopy. I. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 155, 271-349.
- Thacker, R. J., Couchman, H. M. P. (2001). Star Formation, Supernova Feedback, and the Angular Momentum Problem in Numerical Cold Dark Matter Cosmogony: Halfway There?. *The Astrophysical Journal*, 555, L17-L20.
- Tremaine, S., Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., et al. (2002). The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation. *The Astrophysical Journal*, 574, 740-753.
- Urry, C. M., Padovani, P. (1995). Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107, 803-845.

- van den Bosch, F. C. (2000). Semianalytical Models for the Formation of Disk Galaxies. I. Constraints from the Tully-Fisher Relation. *The Astrophysical Journal*, 530, 177-192.
- van den Bosch, F. C., Abel, T., Croft, R. A. C., Hernquist, L., White, S. D. M. (2002). The Angular Momentum of Gas in Protogalaxies. I. Implications for the Formation of Disk Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 576, 21-35.
- Villalobos, Á.; Helmi, A. (2008). Simulations of minor mergers - I. General properties of thick discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 391, 1806-1827.
- Yun, M. S., Reddy, N. A., Condon, J. J. (2001). Radio Properties of Infrared-selected Galaxies in the IRAS 2 Jy Sample. *The Astrophysical Journal*, 554, 803-822.
- Zavala, J., Okamoto, T., Frenk, C. S. (2008). Bulges versus discs: the evolution of angular momentum in cosmological simulations of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 387, 364-370.